

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ  
КАФЕДРА ДИНАМІКИ І МІЦНОСТІ МАШИН ТА ОПОРУ  
МАТЕРІАЛІВ**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Сергій ПИСКУНОВ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
за освітньо-професійною програмою «Динаміка і міцність машин»  
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»  
на тему: «Напружено-деформований стан конструкції фільтроелементу  
при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні рідини»**

Виконав (-ла):  
студент (-ка) VI курсу, групи МП-92мп  
Волинець Олександр Михайлович \_\_\_\_\_

Керівник:  
д.т.н., проф.  
Крищук Микола Георгійович \_\_\_\_\_

Рецензент:  
д.т.н., проф.  
Данильченко Ю.М. \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.  
Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма – «Динаміка і міцність машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій ПИСКУНОВ

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

Волинцю Олександру Михайловичу

1. Тема дисертації «Напружено-деформований стан конструкції фільтроелементу при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні рідини», науковий керівник дисертації Крищук Микола Георгійович, д.т.н., проф., затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р. № \_\_\_\_\_
2. Термін подання студентом дисертації: 10.12.2020 р.
3. Об'єкт дослідження: кавітаційні процеси в ультразвуковому середовищі.
4. Предмет дослідження: НДС та довговічність конструкції фільтроелементу.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
  - 1) Огляд сучасного стану проблеми технології ультразвукової фільтрації рідини
  - 2) Математичне моделювання процесу взаємодії засміченої рідини з фільтроелементом в умовах ультразвукової кавітації
  - 3) Проведення обчислювального експерименту на основі створеної математичної моделі
  - 4) Обробка та аналіз отриманих результатів
  - 5) Розробка стартап–проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу – 6 і більше.
7. Орієнтовний перелік публікацій – 1 і більше.
8. Дата видачі завдання: 01.09.2020 р.

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Ознайомлення з літературою та постановка задачі	10.09.20-01.10.20	Виконано
2	Розробка математичної моделі НДС конструкції фільтроелементу при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні рідини	01.10.19-15.10.20	Виконано
3	Формулювання вихідних даних для визначення НДС фільтроелементу	15.10.19-01.11.20	Виконано
4	Розрахунково-теоретичні дослідження несучої спроможності конструкції фільтроелементу	01.11.19-15.11.20	Виконано
5	Обробка отриманих результатів	15.11.19-22.11.20	Виконано
6	Стартап-проект та висновки	22.11.19-24.11.20	Виконано
7	Підготовка презентації по стану роботи	24.11.19-27.11.20	Виконано
8	Оформлення роботи	27.11.19-14.12.20	Виконано

Студент \_\_\_\_\_

Олександр ВОЛИНЕЦЬ

Науковий керівник \_\_\_\_\_

Микола КРИЩУК

## Анотація

Дипломна робота містить: 84 сторінки, 15 таблиць, 43 рисунка, список використаної літератури з 18 найменувань.

Актуальність роботи полягає в необхідності модернізації існуючих фільтрувальних систем шляхом збільшення довговічності та надійності конструкції. За допомогою комп'ютерної моделі можна провести необхідні обчислення і дослідження та отримати задовільний результат за менших ресурсів роботи, часу та фінансів. Отриманий результат можна підкріпити натурним експериментом та зробити висновки про роботу.

*Об'єктом дослідження* в даній роботі вибрано конструкції з фільтрувальним елементом для ультразвукових процесів очищення забруднених рідин різної в'язкості, що супроводжуються кавітаційними явищами.

*За мету роботи* покладено визначення напружено-деформованого стану конструкції фільтроелементу з покращеними характеристиками ресурсу працездатності матеріалів в існуючих системах ультразвукової очистки забруднених рідин.

*Задачами* даної роботи є:

- встановлення закономірностей зміни гідромеханічних параметрів вязкої рідини для ультразвукових процесів збурення її коливань та кавітації;
- визначення параметрів гідромеханічного навантаження фільтроелементу в умовах ультразвукових процесів очищення забруднених рідин різної в'язкості;
- розробка математичної моделі для визначення напружено- деформованого стану (НДС) конструкції фільтроелементу для технологічних режимів експлуатації;
- чисельне моделювання НДС фільтроелементів з різними типами конструкційних матеріалів в умовах їх пошкоджень від кавітаційної корозії

та ультразвукового поля за допомогою CAD / CAE систем та інформаційних технологій.

– розробка рекомендацій по вибору матеріалів для виготовлення конструкцій фільтроелементів, що мають фізико-механічні характеристики із забезпеченням заданих показників надійності.

**Ключові слова:** фільтрування; ультразвукова кавітаційна обробка; ультразвукове поле; ультразвукова кавітація, удар, імітаційне моделювання, деформації, напруження

## Abstract

Thesis contains: 84 pages, 15 tables, 43 figures, list of references from 18 titles.

*The urgency of the work* lies in the need to upgrade existing filtration systems by increasing the durability and reliability of the structure. With the help of a computer model, you can perform the necessary calculations and research and get a satisfactory result with less resources, time and money. The obtained result can be supported by a full-scale experiment and conclusions can be drawn about the work.

*The object of study* in this paper is the design with a filter element for ultrasonic processes of purification of contaminated liquids of different viscosities, accompanied by cavitation phenomena.

*The purpose of the work* is to determine the stress-strain state of the filter element structure with improved characteristics of the service life of materials in existing systems of ultrasonic cleaning of contaminated liquids.

*The objectives* of this work are:

- establishment of regularities of change of hydromechanical parameters of viscous liquid for ultrasonic processes of perturbation of its oscillations and cavitation;
- determination of parameters of hydromechanical loading of a filter element in the conditions of ultrasonic processes of clearing of the polluted liquids of various viscosity;
- development of a mathematical model for determining the stress-strain the state of the filter element design for technological modes of operation;
- numerical modeling of VAT filter elements with different types of structural materials in terms of their damage from cavitation corrosion and ultrasonic field using CAD / CAE systems and information technology.

- development of recommendations for the choice of materials for the manufacture of filter elements that have physical and mechanical characteristics with the provision of specified reliability.

**Keywords:** filtering; ultrasonic cavitation treatment; ultrasonic field; ultrasonic cavitation, impact, simulation, deformation, stress

## Зміст

ВСТУП .....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	11
1.1 Технічні характеристики ультразвукової фільтрації.....	13
1.2 Фізичні основи процесу ультразвукової очистки забруднених рідин .	15
1.3 Міцність та зносостійкість конструкційних матеріалів фільтраційного обладнання.....	28
1.4 Постановка задачі дослідження процесу взаємодії засміченої рідини з фільтроелементом .....	35
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ЗАСМІЧЕНОЇ РІДИНИ З ФІЛЬТРОЕЛЕМЕНТОМ В УМОВАХ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КАВІТАЦІЇ .....	37
2.1 Фізичні властивості матеріалів .....	37
2.2 Задача Герца з урахуванням динамічного впливу.....	39
2.3 Метод скінченних елементів .....	46
2.4 Математична постановка задачі .....	48
3 ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ .....	50
3.1 План обчислювального експерименту.....	50
3.2 Моделювання НДС при статичному навантаженні під дією сили тяжіння частинки забруднювача. ....	50
3.3 Розрахунок коефіцієнтів динамічності для різних швидкостей руху частинки .....	55
3.4 Моделювання НДС фільтроелементу з урахування коефіцієнта динамічності .....	59
3.5 Аналіз результатів .....	67
4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	71
4.1 Концепція стартап-проекту .....	71
4.2 Аналіз можливості реалізації проекту.....	73
Висновки .....	81
Список літератури.....	83



## ВСТУП

Багато технологічних процесів, а також робота гідросистем залежить від якості фільтрування технічних рідин. Для фільтрування рідин використовують різні способи фільтрування, наприклад, фільтри з сітчастими або пористими перегородками, відцентрові фільтри, фільтри, що створюють високі відносні швидкості переміщення фільтрувальної перегородки і забрудненої рідини, наприклад, за рахунок швидкого обертання в рідині циліндричної фільтрувальної перегородки. Всі вище зазначені способи фільтрування мають декілька суттєвих недоліків. Перш за все, це необхідність в періодичному механічному очищенні фільтроелементу за допомогою протитиску або періодичного обертання ножів, які прочищають пази щілинних фільтроелементів, та за допомогою низькочастотних вібраційних електроприводів, які забезпечують періодичне або безперервне скидання осаду з фільтруючої перегородки. Ще один недолік полягає в малій сміттєємності фільтроелементів у фільтрах тонкого очищення, що призводить до швидкого засмічування фільтроелементу і, як наслідок, зростання перепаду тиску на ньому.

Однак існує ще один спосіб фільтрування рідини, який полягає в розміщенні фільтроелементу в ультразвуковому полі, інтенсивність якого перевищує поріг виникнення в рідині кавітації. Особливості фільтрування в даному випадку забезпечуються вторинними ефектами, що супроводжують явище ультразвукової кавітації, а саме, дегазацією, мікротечіями, ударними хвилями, акустичною турбулентністю, потужними кумулятивними мікроструменями і т. ін.. На відміну від відомих способів знезараження ультразвукова кавітаційна обробка рідини не вимагає застосування небезпечних для здоров'я людини і навколишнього середовища хімічних компонентів. Ультразвукове кавітаційне фільтрування безпечно для оточуючих і не вимагає кваліфікованого обслуговуючого персоналу.

Відомо кілька варіантів реалізації способу фільтрування в ультразвуковому полі – з використанням фільтрувальної перегородки або без неї, у полі, утвореному стоячою ультразвуковою хвилею, ультразвуковою хвилею що протікає в дифузному ультразвуковому полі. У разі використання варіанту фільтрування в ультразвуковому полі стоячої хвилі корпус фільтра виконується резонансним з розмірами, кратними  $\frac{1}{2}$  довжини хвилі ультразвукових коливань в рідині, що очищається.

Однак, широкому застосуванню цього способу фільтрування заважає недостатня вивченість деяких процесів в кавітаційному середовищі, а саме, вплив частинок забруднювача на стійкість та довговічність фільтроелементу та деталей корпусу, відсутність рекомендацій з вибору конструкційних матеріалів для подібних конструкцій. Також значною проблемою є явище кавітаційної корозії, що виникає в наслідок постійного впливу ударних хвиль від схлопування кавітаційних бульбашок.

Метою роботи є дослідження процесу ударної взаємодії частинки забруднювача та ударної хвилі з фільтрелементом, що в данному випадку являє собою сітку з балочних елементів, виготовлену із деякого матеріалу(він буде визначений експериментальним шляхом у ході роботи), при ультразвуковому кавітаційному фільтруванні забрудненої рідини. Для дослідження будуть використані вода, мастило та бензин.

# 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

На сьогоднішній день фільтрація рідин є дуже важливим аспектом для цивілізації. Існує чимало методів очистки різних типів рідини, як побутової так і технічної. За типом фільтрації їх можна умовно поділити на такі групи: механічні, фізико-хімічні, біологічні, магнітні, гравітаційні. Всі вони мають своє призначення, переваги, та недоліки.

*Механічні* фільтри використовуються для очистки рідин від твердих домішок та являють собою сітчастий елемент, що утримує домішки всередині фільтру. Фільтрувальний елемент може бути як поверхнею(сітки, тканини, папір) так і об'ємним(фетр, губка, войлок, картон). Це найпростіший метод фільтрації, але він має суттєвий недолік: фільтрувальний елемент достатньо швидко забивається частинками бруду і стає непридатним до використання. Для автоматизації очистки самих фільтрів потрібно модернізувати конструкцію за допомогою протитиску або періодичного обертання ножів, які прочищають пази щілинних фільтроелементів, що ускладнює її виготовлення та використання.

*Фізико-хімічні* фільтри основані на відповідних процесах. Найбільш поширеним є метод сорбції. Процес оснований на поглинанні домішок із рідин або газів поверхнями твердих тіл(адсорбентів). Адсорбентами найчастіше виступають: зола, торф, тирса, шлаки, глина та активоване вугілля. Такі фільтри на основі вугілля широко використовуються в побуті для очищення питної води. Інший розповсюджений метод – аерація. Вода у вигляді повітряно-водяної суміші розпилюється в резервуар, де кисень окислює розчинене залізо, марганець, органічні речовини, після чого окислені нерозчинені домішки випадають у вигляді осаду, та очищаються на подальших стадіях механічної очистки. Існує також метод напірної аерації, який використовує той самий процес, що і у попередньому методі, але замість розпилення, у воду під тиском закачується повітря з подальшим окисленням і т.д. Ще один метод базується на хімічних реакціях при додаванні спеціальних

хімічних реагентів у рідину, які викликають реакцію з випаданням осаду і його подальшій механічній очистці. Такий метод не є безпечним для людини через додавання небезпечних реагентів у воду, тому не використовується для побутових цілей.

При *біологічній* фільтрації відбувається очистка води мікроорганізмами, що приймають участь у природних обмінних процесах. На відмінну від механічної очистки, бактерії очищують воду від розчинених у ній органічних речовин, шляхом розкладання їх на нітрати. Такий метод використовується в основному в акваріумах та для очистки стічних вод.

*Магнітні* фільтри являють собою магніт або електромагніт, який за допомогою електро-магнітних властивостей притягує феромагнітні домішки із рідини. Використовується наприклад у зливній системі двигуна або коробки передач. Магніт встановлюється в пробку для зливу мастила в піддоні, та притягує на себе стальну стружку, що утворюється в наслідок зношення елементів механізму.

*Гравітаційні* фільтри(відстійники) використовуються в основному для машинного мастила. Принцип роботи складається в тому, що мастило, протікаючи через відстійник, потрапляє у відносно великий резервуар, де його швидкість падає, і під дією гравітації частинки, що мають більшу щільність ніж мастило, випадають в осад. Використовується цей спосіб переважно разом з фільтроелементом грубої або тонкої очистки. Одним із різновидів гравітаційних фільтрів є відцентровий фільтр. Принцип роботи відрізняється лише тим, що у відцентрових фільтрах замість сили тяжіння використовується відцентрова сила під час обертання у центрифугі.

Окрім цих типів існують також іонообмінні, електричні та фільтри зворотного осмосу.

## 1.1 Технічні характеристики ультразвукової фільтрації

Ультразвукові фільтри можна віднести до категорії фізико-хімічних фільтрів. Вони працюють на основі явища кавітації, яке виникає в наслідок інтеграції у фільтр ультразвукового поля. Такі фільтри використовуються для очищення рідин(в основному технічних) а також поверхонь твердих тіл. Перші прилади, основані на цьому принципі з'явилися у 1950-х роках та використовувалися саме для очистки поверхонь. Невідомо, хто саме придумав використовувати ультразвук для фільтрації рідин, але 09.12.1991 року був зареєстрований патент №2037327 на ім'я Ковалев Олександр Олександрович, в якому був описаний механізм ультразвукового фільтра для рідини.[1] Принцип роботи кавітаційного фільтру з фізичної точки зору буде розглянутий у наступному пункті, а зараз розглянемо основні положення щодо процесу фільтрації ультразвуком.

*Ультразвук* – це пружні коливання та хвилі, частота яких вище чутної області людини(15..20кГц). Абсолютна нижня границя ультразвуку з фізичної точки зору вважається 20кГц.

Це обумовлено фізичною природою пружних хвиль, що можуть розповсюджуватися лише у матеріальному середовищі, тобто при умові, що довжина хвилі значно більша за довжину вільного пробігу молекул в газах, або міжатомних відстаней у рідинах та твердих тілах. З іншої сторони нижня границя ультразвуку починається із верхньої границі чутної області для людини. Цей параметр є умовним і залежить від суб'єктивних особливостей людського слуху.

*Ультразвукова фільтрація* – метод фільтрації, оснований на використанні нелінійних ефектів, що виникають у рідині під дією ультразвукових коливань. Серед цих ефектів головне значення має *кавітація*. До побічних ефектів можна віднести: акустичні течії, звуковий тиск, звуко-капілярний ефект.

*Кавітація* – процес утворення порожнин та бульбашок в ультразвуковому полі під час фази розтягу, що присутня при змінному звуковому тиску. Під час фази стику ці порожнини та бульбашки захлопуються, що призводить до вихлопу енергії яка утворює мікротечії у рідині.

Спочатку під кавітацією мали на увазі «розрив рідини» при створенні в ній негативних тисків. Однак міцність рідини до розриву достатньо велика: для утворення порожнини теоретично необхідно створити негативний тиск приблизно 10000 атм. За теорією Зельдовича спонтанний розрив однорідної рідини можливий при негативних тиску не менше 1000 атм. У той же час, кавітаційна міцність рідин, не підданих спеціальній обробці, становить 0,02-10 атм, і лише для спеціально приготованих зразків води досягнута кавітаційна міцність 275 атм. Настільки низьку міцність рідини пов'язують з наявністю в ній різних мікронеоднорідностей (головним чином - мікробульбашок, а також твердих мікрочастинок, що містять адсорбовані гази).

Таким чином на практиці під кавітацією мають на увазі не утворення нових порожнин та бульбашок, а взаємодію ультразвукового змінного поля з уже існуючими у рідині бульбашками та порожнинами. Ці мікробульбашки називаються *зародками кавітації*.

Розриви тканин утворюються на кавітаційних зародках або «слабких точках» рідкого середовища. Механізм тривалого існування (стабілізації) в рідинах слабких точок, якими переважно є мікроскопічні газові бульбашки, вже давно уявлявся загадковим і тривалий час був предметом дискусії. Справа в тому, що великі бульбашки повинні спливати за рахунок стоксової сили плавучості, а малі бульбашки повинні розчинитися під дією тиску, обумовленого поверхневим натягом. Для пояснення виникнення і стабільного існування в рідинах газових бульбашок - кавітаційних зародків були залучені різні механізми, детально розглянуті в ряді книг і оглядів. Так, було показано, що зародки кавітації можуть безперервно створюватися в воді під дією космічних променів, нейтронів та інших частинок високих енергій. Фокс і

Герцфельд висунули припущення, що органічні молекули можуть формувати оболонку на поверхні бульбашки, яка перешкоджає дифузії газу з нього. Інша теорія пов'язана з наявністю мікротріщин на порошинках і домішкових частинках; ці мікротріщини, так само як і тверді частинки, можуть служити концентраторами газу. У забрудненій рідині окрім вищезазначених слабких точок зародками кавітації виступають також частинки бруду.

Діапазон частот ультразвукових апаратів для очищення лежить в межах 20-40 кГц; інтенсивність ультразвукових коливань зазвичай становить 0,5 - 5 Вт / см<sup>2</sup>. Вибір оптимальної інтенсивності має істотне значення для ультразвукового очищення. Змінюючи умови протікання кавітації, можна підсилювати або послаблювати різні кавітаційні ефекти. Наприклад, зі зростанням частоти ультразвуку збільшується роль мікропотоків і зменшується кавітаційна ерозія, зі збільшенням гідростатичного тиску в рідині зростає роль мікроударних впливів. Збільшення частоти зазвичай призводить до підвищення порогового значення інтенсивності, що відповідає початку кавітації, яке залежить від роду рідини, її газовмісту, температури та ін.

Для реалізації технологічних процесів, пов'язаних з ультразвуковою кавітаційною обробкою рідини, найкращими є апарати з проточною циліндричною кавітаційною камерою, що вносять мінімальний опір в існуючі технологічні трубопроводи. Такі апарати зазвичай використовують радіально-вигнуті коливання циліндричного корпусу кавітаційної камери. Для їх створення на зовнішній твірній поверхні встановлюють ультразвукові резонансні випромінювачі. Радіально-вигнуті резонансні коливання стінок камери дозволяють відносно рівномірно розподілити кавітаційні області по перерізу камери.

## **1.2 Фізичні основи процесу ультразвукової очистки забруднених рідин**

При випромінюванні у воду плоскої звукової хвилі частотою 22 кГц середнього рівня інтенсивності, при якому кавітаційні явища вже присутні, але ще слабо виражені, уздовж прозорого стакану з резонансним поздовжнім

розміром, одержувана форма поля, представлена на рис.1.1. З рис. 1.1 випливає, що на поверхні ультразвукового перетворювача, що випромінює ультразвукові хвилі, ще відсутній двофазний кавітаційний прошарок, який призводить до поглинання і розсіювання ультразвукової енергії. Уздовж склянки встановилася стояча хвиля деформації, в пучностях якої накопичуються кавітаційні бульбашки. Відстань між прошарками бульбашок рівна  $\frac{1}{2}$  довжини хвилі. Бульбашки утворюються внаслідок періодичного стиснення і розтягу деформації в звуковій хвилі. [2]

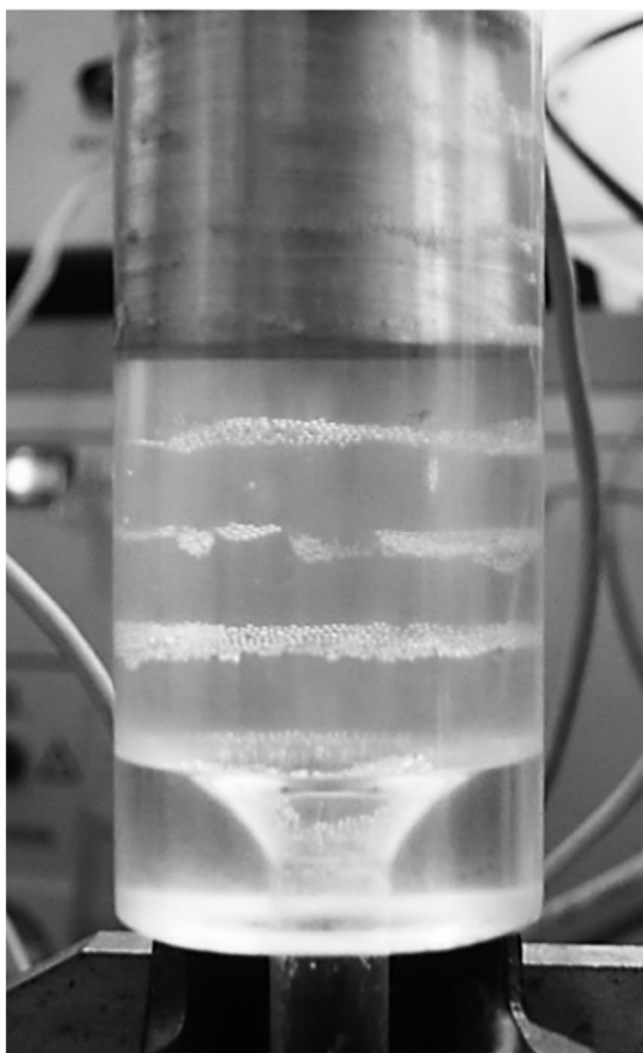


Рис. 1.1. Ультразвукове поле плоскої стоячої хвилі в технологічному об'ємі

Бульбашки кавітацій утворюються із зародків кавітації, в якості яких можуть виступати нерозчинні тверді частинки, нерозчинені гази, мікро



бульбашки нерозчинених газів, що знаходяться в мікротріщинах на твердих поверхнях, що межують з рідиною, і.т.д. Кавітаційні парогазові бульбашки збільшуються в розмірах в фазі розрідження і схлопуються в фазі стиснення звукової хвилі після здійснення одного або декількох коливань.

Мінімальний розмір зародків, здатних порушити ультразвукову кавітацію, повинен бути вище критичного розміру.

$$R_{кр} = \sqrt{3}R_0 \left[ \frac{R_0}{2\sigma} \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \right]^{1/2} \quad (1.1)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу,  $R_0$  – початковий радіус бульбашки,  $p$  – гідростатичний тиск. Наведений вираз справедливий при умові, що тиск насичених парів дуже малий в порівнянні з амплітудним звуковим тиском.

Максимальний розмір зародків, здатних спричинити ультразвукову кавітацію, відповідає їх резонансним розмірами, при яких їх власна частота дорівнює частоті звукової хвилі в рідині. Резонансний розмір зародка і частота коливань пов'язані залежністю:

$$(2\pi f)^2 = \frac{3\gamma_a}{\rho R_{рез}^2} \left( p_a + \frac{2\sigma}{R_{рез}} \right) \quad (1.2)$$

де  $f$  – частота звукових коливань,  $R_{рез}$  – резонансний розмір зародка,  $\gamma_a$  – показник адіабати,  $\rho$  – густина рідини в стані спокою,  $p_a$  – звуковий тиск, створений ультразвуковим полем. У стоячій звуковій хвилі парогазові бульбашки, які мають розміри менше  $R_{рез}$ , пульсують в фазі з коливаннями тиску і зміщуються до пучностей тиску, а при розмірах, що перевищують  $R_{рез}$ , переміщуються до вузлів тиску. Швидкість руху бульбашок визначається залежністю:

$$v_{бульб} = \frac{R_0^2}{10\mu \left( p_0 + \frac{4\sigma}{3R_0} \right)} p_a \frac{\delta p_a}{\delta x} \quad (1.3)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт в'язкості рідини,  $x$  – просторова координата.

При швидкому русі рідини відносно твердого тіла, внаслідок утворення і зникнення (схлопування) бульбашок поблизу поверхні, виникають кавітаційні руйнування, які називаються *кавітаційною ерозією*.

Кавітаційна ерозія металів викликає руйнування гребних гвинтів суден, робочих органів насосів, гідротурбін і т. д. Кавітація також є причиною шуму, вібрації та зниження ефективності роботи гідроагрегатів.

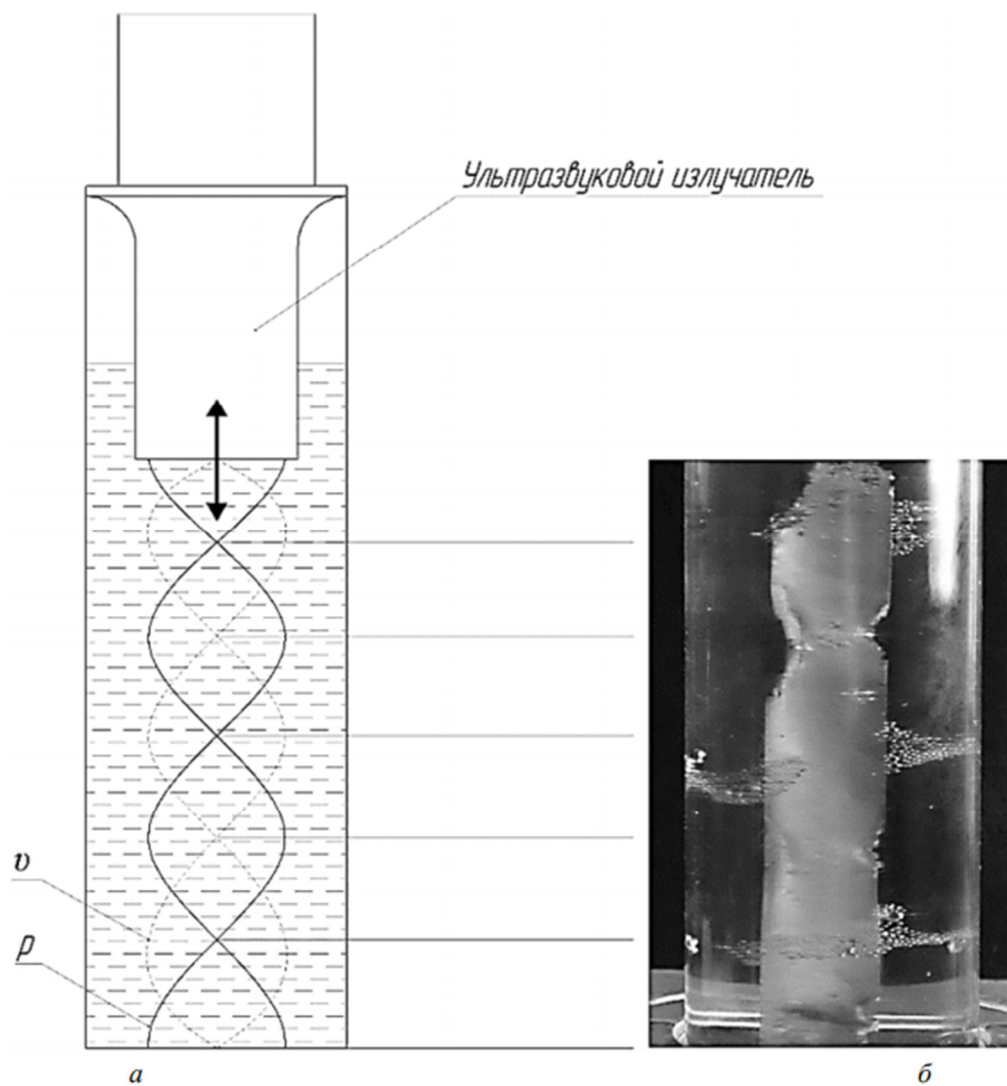


Рис. 1.2. Схема розміщення ультразвукового поля плоскої стоячої хвилі (а) і фотографія кавітаційної ерозії тестової алюмінієвої фольги в місцях, відповідних пучностям тиску (б)

У пучностях хвилі тиску, де збираються бульбашки розміром менше  $R_{рез}$ , внаслідок чергування фаз стиснення і розрідження, зробивши одне або кілька повних коливань і накопичивши при цьому енергію, бульбашки схлопуються з утворенням ударних хвиль, які призводять до ерозійного руйнування тестової фольги (Рис. 1.2б). Випробувальна фольга на рис. 1.2б додатково показує, що максимальна інтенсивність ерозійного руйнування спостерігається поблизу поверхні, що випромінює в ультразвуковому перетворювачі. По мірі віддалення пучностей тиску від поверхні, що випромінює інтенсивність кавітаційної ерозії зменшується, що пояснюється втратами ультразвукової енергії при проходженні хвилі через двофазні кавітаційні прошарки, які поглинають і розсіюють ультразвукову енергію.

Трансляційний рух бульбашок до вузлів тиску стоячій звукової хвилі призводить до коагуляції бульбашок в цих зонах, тобто збільшення їх розмірів. Такі великі бульбашки, перебуваючи в зоні з практично нульовим звуковим тиском, не схлопуються. Саме такі прошарки бульбашок і спостерігаються візуально на експериментальних фотографіях звукового поля плоских стоячих хвиль (рис. 1.1 і рис. 1.2б). Тестова алюмінієва фольга, розміщена в кавітаційній камері нормально до поверхні, що випромінює ультразвукові хвилі, показує відсутність кавітаційної ерозії фольги в площинах, відповідних вузлам тиску в стоячій хвилі (рис. 1.2б).

Зважена частинка забруднювача рідини, опинившись біля кавітаційного пухирця, відчуває або вплив потоку рідини від рухомих з великою швидкістю стінки бульбашки, або вплив ударної хвилі при схлопуванні бульбашки. Для випадку сферичної форми частинки забруднювача рівняння її руху в рідині може бути представлено у вигляді:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{\pi K_{оп}}{8} \rho d^2 (U - v)^2 \quad (1.4)$$

Де  $m$  – маса частинки забруднювача;  $v$  – швидкість руху частинки;  $U$  – швидкість руху стінки кавітаційної бульбашки;  $K_{оп}$  – коефіцієнт лобового опору;  $d$  – діаметр частинки.

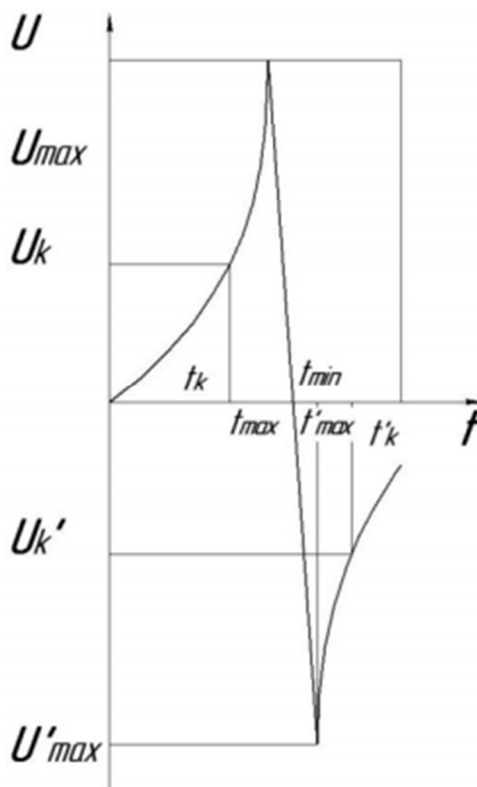


Рис. 1.3. Характер зміни швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки в фазі стиснення та фазі розширення

Згідно з даними роботи [3] характер зміни швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки має вигляд, представлений на рис. 1.3. З рисунка слідує, що стиснення бульбашки відбувається за законом, близькому до експоненціального. Різке зростання швидкості починається з деякого критичного значення  $U_k$ . Досягнувши значення  $U_{max}$  при вже мінімальному розмірі бульбашки, швидкість падає до нуля. За даними роботи [4] характер зміни швидкості стінки кавітаційного пухирця в фазі розширення є симетричним відображенням фази стиснення.

Для випадку утворення кавітаційної бульбашки у в'язкій рідині при введенні в неї ультразвукової хвилі швидкість руху стінки бульбашки можна описати рівнянням Херрінга-Флінна [5, 6].

$$\begin{aligned}
 & R \left( 1 - \frac{2U}{c_p} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( 1 - \frac{4U}{3c_p} \right) \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \\
 & + \frac{1}{\rho} \left[ p_0 - p_n - p_a \sin \omega t + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu U}{R} \right. \\
 & \left. + \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] + \frac{RU}{\rho c_p} \left( 1 - \frac{U}{c_p} \right) \frac{dp(R)}{dR} = 0
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

де  $p_n$  – тиск пара;  $U = \frac{dR}{dt}$  – швидкість схлопування бульбашки;  $c_p$  – швидкість звуку рідини в стані спокою;  $\omega = 2\pi f$  – кругова частота звукових коливань;  $\gamma$  – показник політропи.

Рішення цього рівняння для випадку утворення кавітаційної бульбашки проведено при значеннях, показаних на табл.1. Результати розрахунку представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 1.4

Таблиця 1. Початкові значення, використані при моделюванні динаміки кавітаційної бульбашки

	$f, \text{кГц}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\sigma, 10^{-3} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$p_0, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$p_n, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$p_a, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	$R_0, \text{м}$
Вода	22	20	0,001	1000	74	$4 \cdot 10^6$	2300	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
Бензин	22	20	0,0005	750	21	$4 \cdot 10^6$	66000	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$
АМГ-10	22	20	0,51	850	28,9	$4 \cdot 10^6$	-	$4 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^{-6}$

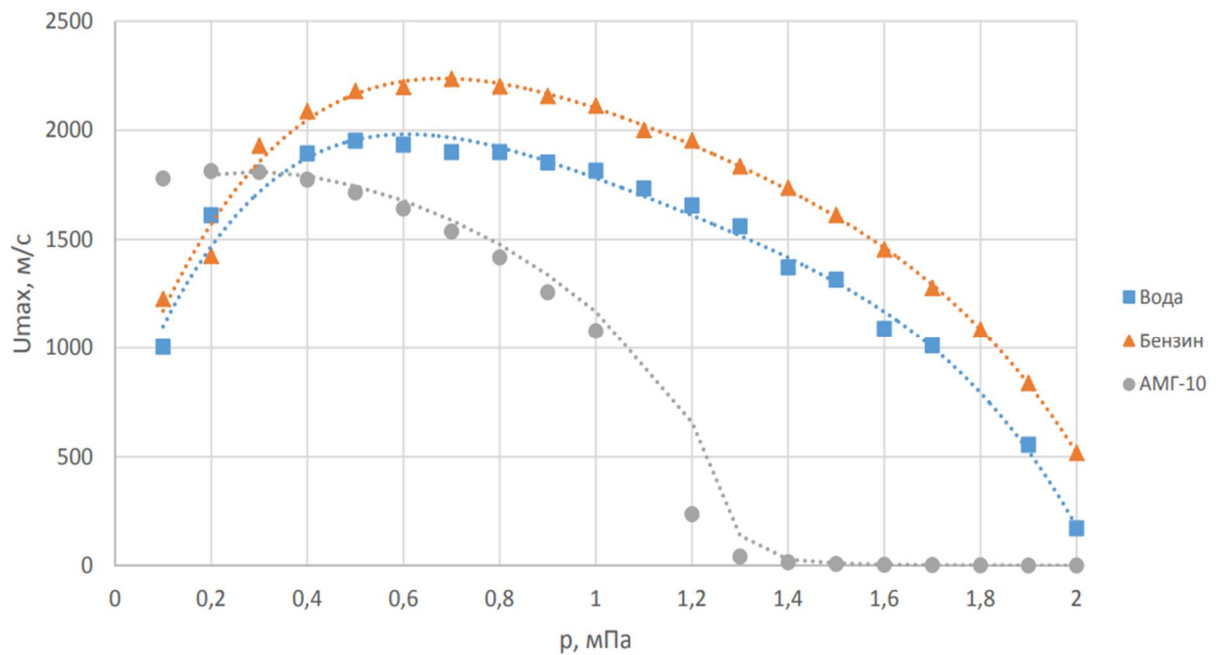


Рисунок 1.4. Залежність швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки у фазі стиснення від статичного тиску в рідині

\*АМГ-10: Гідравлічні мастила. Використовуються в вузлах і агрегатах для зниження коефіцієнта тертя деталей і зменшення їх зносу. За характеристиками мастило АМГ-10 призначається для використання в гідросистемах авіаційної техніки і автотранспорту. Аналогів і замінників не має.

Вважаючи рух стінки кавітаційної бульбашки на ділянці  $t_{max} - t_k$  рівноприскореним, рівняння руху частинки у рідині можна переписати у вигляді:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\pi K_{оп}}{8m} \rho d^2 (at - v)^2 \quad (1.6)$$

де  $K_{оп} = 0,8$ ;  $a$  – прискорення руху частинки забруднювача. Інтегруючи отриманий вираз у межах від 0 до  $t_{max} - t_k$ , отримаємо:

$$v = at + \sqrt{\frac{a}{A}} \cdot \frac{1 - e^{2\sqrt{aA}\tau}}{1 + e^{2\sqrt{aA}\tau}} \quad (1.7)$$

$$\text{де } \tau = t_{max} - t_k; A = \frac{\pi K_{оп} \rho d^2}{8m}.$$

Результати розрахунку швидкості руху частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки пульсуючої кавітаційної бульбашки, виконані за попереднім виразом, представлені у вигляді графіків на рис.1.5. Отримані результати свідчать про можливість досягнення частками забруднювача надзвукової швидкості переміщення в рідині.

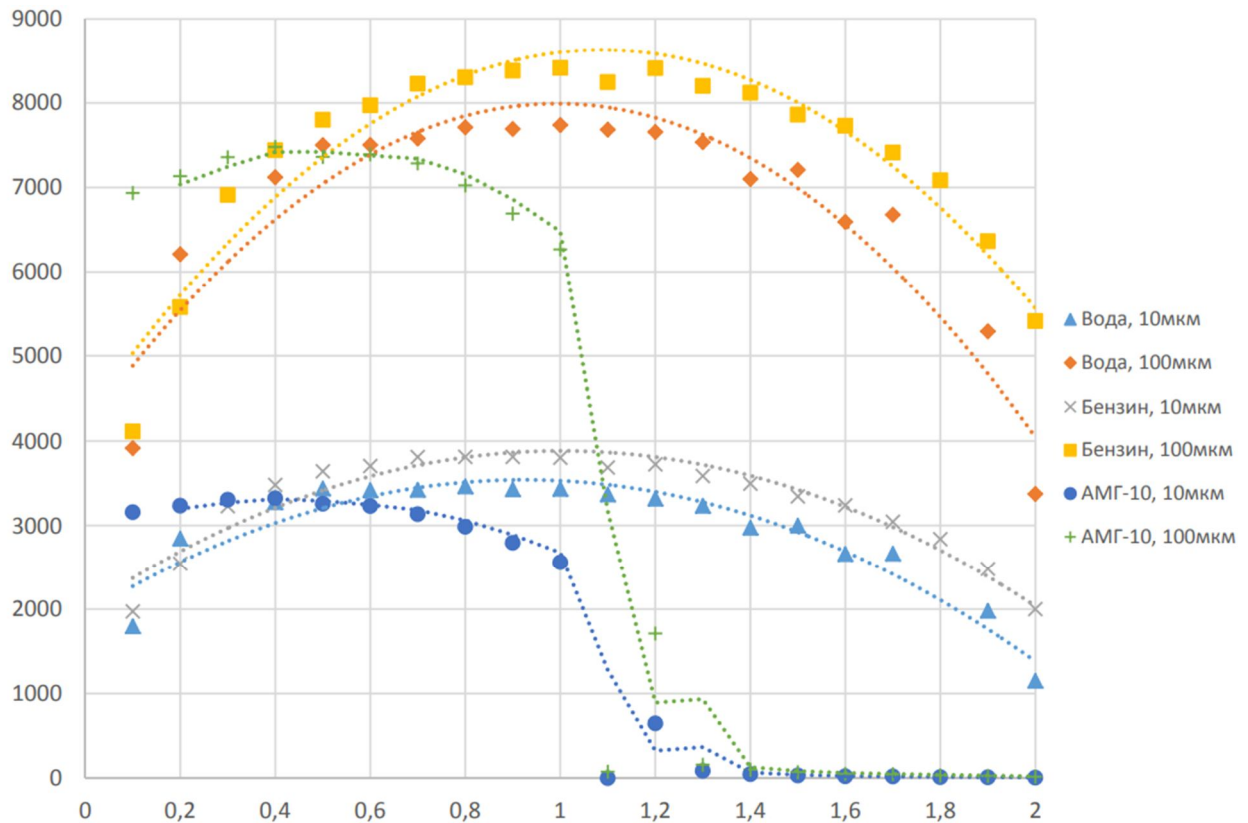


Рисунок 1.5. Залежність швидкості руху частинок забруднювача різної маси і розмірів, що знаходяться у кавітаційному середовищі біля стінки бульбашки

У припущенні сталості швидкості руху стінки кавітаційної бульбашки і її рівність середньоарифметичному значенню, можна визначити шлях, який частка забруднювача пройде, на ділянці  $t_{max} - t_k$  з надзвуковою швидкістю, записавши рівняння руху частинки у рідині в такому вигляді:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A \left( U - \frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (1.8)$$

Інтегруючи цей вираз отримаємо:

$$x = \frac{1}{A} [UA\tau - \ln(1 + UA\tau)] \quad (1.9)$$

Результати розрахунку величини переміщення частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки кавітаційної бульбашки, яка схлопується в залежності від розмірів частинки і статичного тиску зведені в табл.2.

*Таблиця 2.* Залежність величини переміщення частинки забруднювача, що знаходиться біля стінки кавітаційної бульбашки, яка схлопується, від розмірів частинки і статичного тиску

Діаметр частинки, мкм	Статичний тиск, МПа	Переміщення у воді, мкм	Переміщення в бензині, мкм	Переміщення в АМГ-10, мкм
10	0,1	41,279702	74,60884	38,5649
	0,5	39,107835	54,17943	25,67424
	1	22,328168	34,98349	6,970632
	1,5	5,675779	14,38415	6,211486
	2	41,327390	0,641432	0,125832
100	0,1	6,026788	12,21081	5,565946
	0,5	5,657538	8,309672	3,480699
	1	2,969696	4,969105	0,821381
	1,5	0,658521	1,813939	0,725461
	2	6,034946	0,067504	0,012873

Аналіз отриманих розрахункових значень величини переміщення частинки забруднювача в кавітаційній області ультразвукового поля значно перевищує розміри отворів фільтрувальної перегородки, які в фільтрах тонкого очищення становлять 5 ... 20 мкм. Коливальні рухи цих часток не дозволяють забруднювачу проникнути через пори фільтра. Цей ефект іноді називають ефектом «п'яної» частинки. Зіштовхуючись між собою частки, що коливаються, коагулюють і осідають у відстійник фільтра. Проникнути через пори фільтра такі укрупнені частинки не можуть. Зіткнення таких частинок з фільтрувальною перегородкою, сферичні ударні хвилі від бульбашок що



схлопуються в кавітаційній області і високоенергетичні кумулятивні струмені, що виникають при закритті кавітаційних бульбашок поблизу поверхні фільтрувальної перегородки, призводять, крім кавітаційної ерозії фільтрувальної перегородки, до порушення в ній ультразвукових коливань. Ці коливання істотно знижують поверхневе тертя рідини в порах фільтрувального перегородки, що призводить до підвищенню продуктивності фільтра при інших рівних умовах. Знаходження фільтрувальної перегородки в кавітаційному середовищі забезпечує їй, за рахунок супутніх кавітацій ефектів, практичну незасмічуємість.

Використання фільтрувальних перегородок з кавітаційно стійких матеріалів дозволяє на базі розглянутої технології створити фільтри, що відрізняються високими експлуатаційними характеристиками.



Рис. 1.6. Кавітаційна проточна камера з трубчатим вібратором

Кавітаційна камера представляє собою проточний трубчастий резонансний вібратор, що працює на частоті радіальних коливань. Джерелом

коливань в даному випадку слугують чотири п'єзоелектричні приводи, зібрані за пів-хвильовою акустичної схемою із ступінчастим трансформатором швидкості, ступінь малої площі якого була ноже-видною і фіксувалася уздовж твірної на зовнішньої поверхні трубчастого вібратора (Рис. 1.6). Таке конструктивне рішення дозволяло ввести в трубчастий вібратор ультразвукову енергію з мінімальним негативним впливом на форму коливань у вібраторі.

Трубчатий вібратор являє собою відрізок труби зі сталі 12Х18Н10Т з зовнішнім діаметром 75 мм і внутрішнім діаметром 62 мм. Резонансна частота коливань становить 22,2 кГц. Вібратор збуджується на нульовий моді коливань, тобто здійснює радіальні коливання. довжина труби вібратора становить 80 мм, що істотно менше половини довжини хвилі згинальних коливань по довжині труби. Тому під час роботи вся поверхня вібратора здійснює чисто радіальні коливання.

Дослідження ефективності кавітації проводилося за допомогою алюмінієвої фольги, яка поміщалася в трубу вібратора згідно зі схемою (рис. 1.7.). За швидкістю ерозійного руйнування фольги можна було оцінити рівні кавітації і форми кавітаційної області.

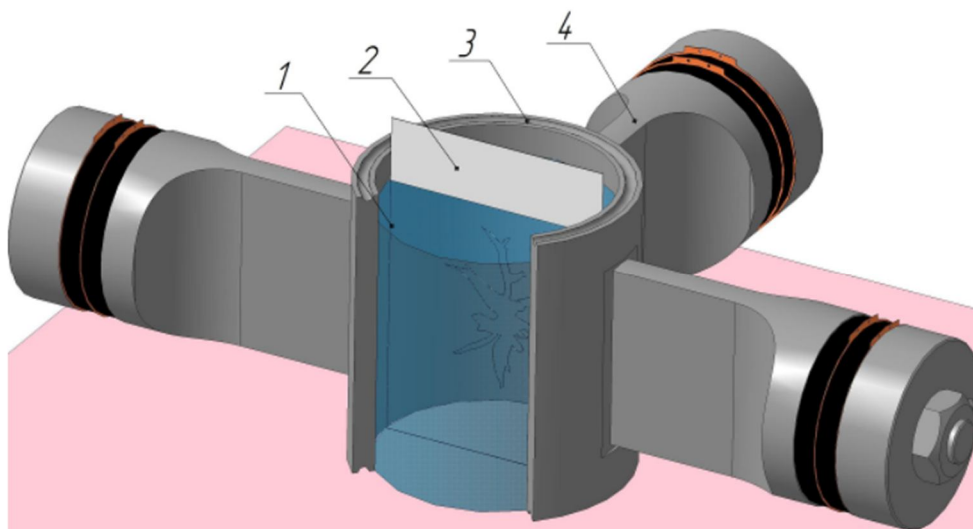


Рис. 1.7. Схема розміщення контрольних зразків фольги у кавітаційній камері (1 – вода, 2 – алюмінієва фольга, 3 – трубчатий вібратор, 4 – УЗ випромінювач)

Дослідження контрольних зразків алюмінієвої фольги показує, що при малій інтенсивності ультразвуку кавітаційна область сконцентрувалася в центральній частині циліндричної камери (рис. 1.8.а.). При збільшенні амплітуди коливань спостерігається ефективне фокусування ультразвукової енергії вздовж осі камери з утворенням кавітаційної області високої інтенсивності (рис. 1.8.б.). На внутрішній поверхні циліндричної камери кавітаційної ерозії не спостерігається, що свідчить про високу ефективність введення в рідину ультразвукової енергії. У міру збільшення інтенсивності ультразвуку амплітуда звукового тиску росте, кавітаційна область поступово розширюється, наближаючись до внутрішньої поверхні камери. Як тільки кавітаційна область торкнеться внутрішньої поверхні камери умови введення в рідину ультразвукової енергії різко погіршуються за рахунок поглинання і розсіювання енергії двофазним середовищем. При цьому рівень кавітації падає і усереднюється по всьому об'єму циліндричної камери (рис. 1.8.в.).

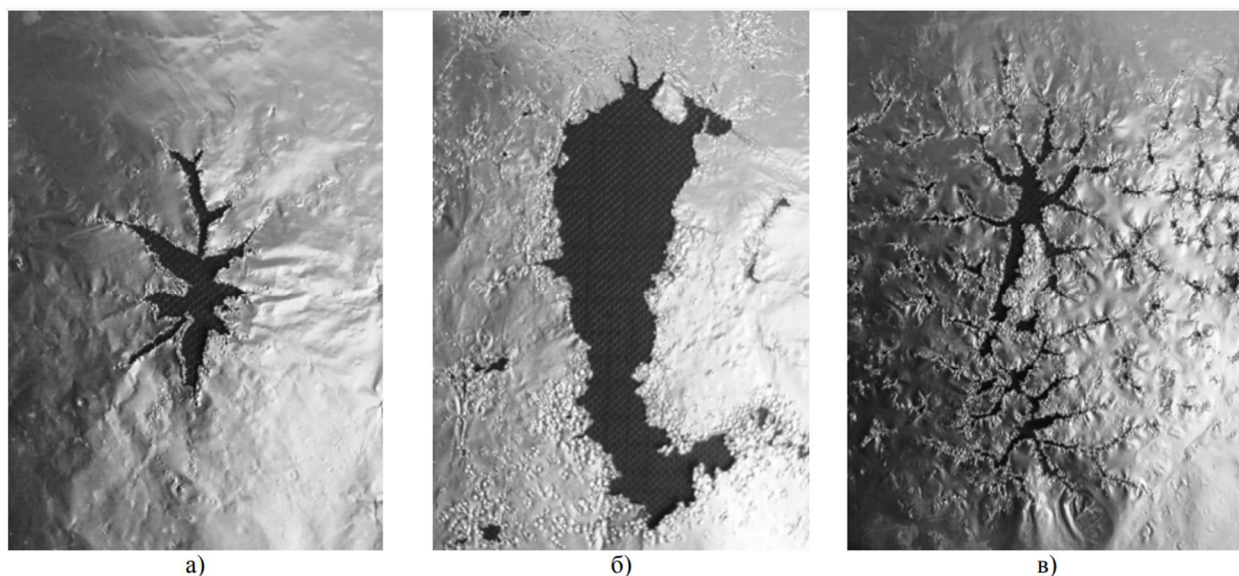


Рис. 1.8. Ерозійне руйнування контрольних зразків фольги в циліндричній камері при різній інтенсивності ультразвуку

Картина поширення кавітаційної області на весь об'єм камери спостерігалася при підведенні потужності 250 ... 300 Вт. Подальше підвищення потужності призводить до нагрівання вібратора і мало впливає на підвищенні рівня кавітації.

Експериментальні дослідження [7] підтвердили ефект концентрування ультразвукової енергії уздовж осі в циліндричному вібраторі при здійсненні радіальних коливань. Підтверджено можливість досягнення в області поздовжньої осі досліджуваного циліндричного кавітатора інтенсивності ультразвуку близько  $50 \dots 60 \text{ Вт / см}^2$ . Підвищення продуктивності технологічного устаткування по знезараженню води, побудованого з використанням подібного циліндричного кавітатора, може бути досягнуто за рахунок послідовної установки декількох акустично розв'язаних проточних трубчастих вібраторів (Рис. 1.9).

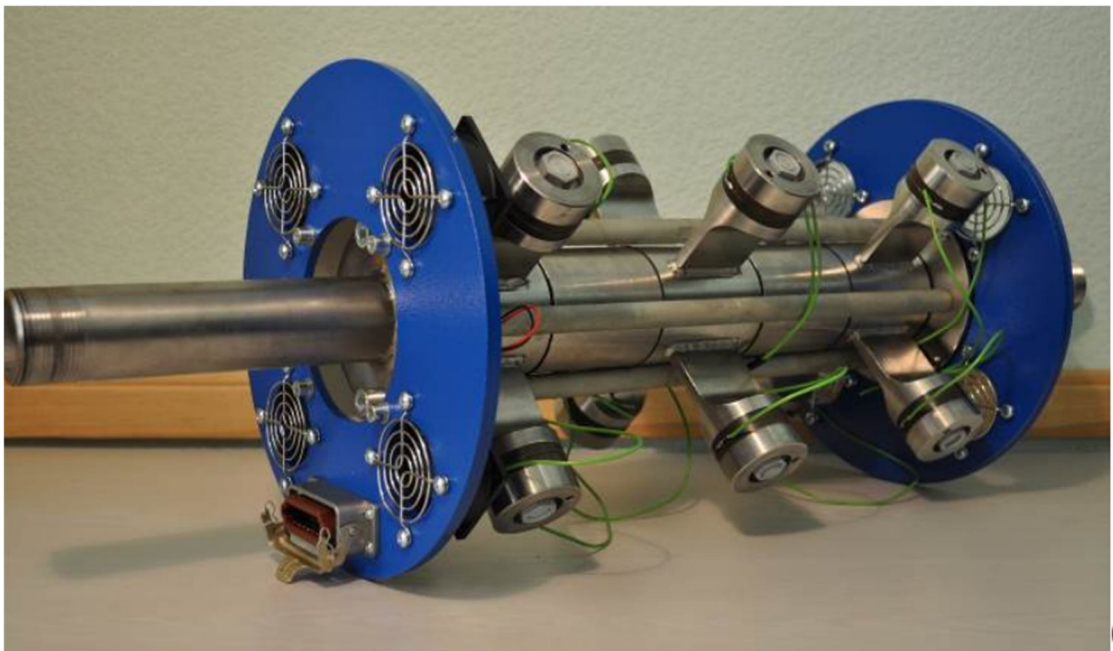


Рис. 1.9. Трьох-секційна проточна камера з трубчатим вібратором.

### **1.3 Міцність та зносостійкість конструкційних матеріалів фільтраційного обладнання**

Проблема забезпечення заданих показників надійності є ключовою при конструкторсько-технологічному проектуванні нових і вдосконаленні існуючих зразків виробів сучасного машинобудування. Це в повній мірі відноситься і до виробів, які працюють в умовах гідродинамічного навантаження. Такому навантаженню піддаються найбільш характерні групи

відповідальних деталей такі як робочі колеса насосних агрегатів, рушії (гребні гвинти) морських і річкових суден, турбіни гідроелектростанцій (ГЕС) та ін.

Елементи багатьох конструкцій і пристроїв часто працюють в умовах кавітуючої рідини, піддаючись інтенсивної ерозії. Конструктивно-експлуатаційні методи боротьби з їх кавітаційним руйнуванням часто не дають бажаного результату. У цих умовах раціональний вибір конструкційного матеріалу багато в чому сприяє успішній боротьбі з цим негативним явищем. Цей вибір пов'язаний з необхідністю визначення їх ерозійної стійкості за критеріями оцінки.

Кавітаційне руйнування деталі обумовлено наступними факторами: безпосередніми ударами струменів рідини об поверхню металу (механічний вплив); тиском, що виникає при утворенні і руйнуванні парогазових бульбашок; хімічним впливом агресивних реагентів, що активізуються в швидкоплинному потоці; ультразвуковими коливаннями, що виникають при утворенні і змиканні бульбашок; електричними розрядами, що з'являються в момент руйнування каверн.

Встановлено, що головною причиною кавітаційної ерозії металевих поверхонь є схлопування поблизу них кавітаційних бульбашок. При цьому кінетика процесу руйнування матеріалу описується кривої ерозії (втрат маси або об'єму в часі), на якій, як при процесі втоми, виділяють стадії утворення і розвитку ерозійних пошкоджень (Рис. 1.10). Традиційним критерієм ерозійної стійкості матеріалу служить втрата його маси (об'єму) за певний період часу. Цей критерій не враховує умови навантаження, фізику процесу і властивості матеріалу.

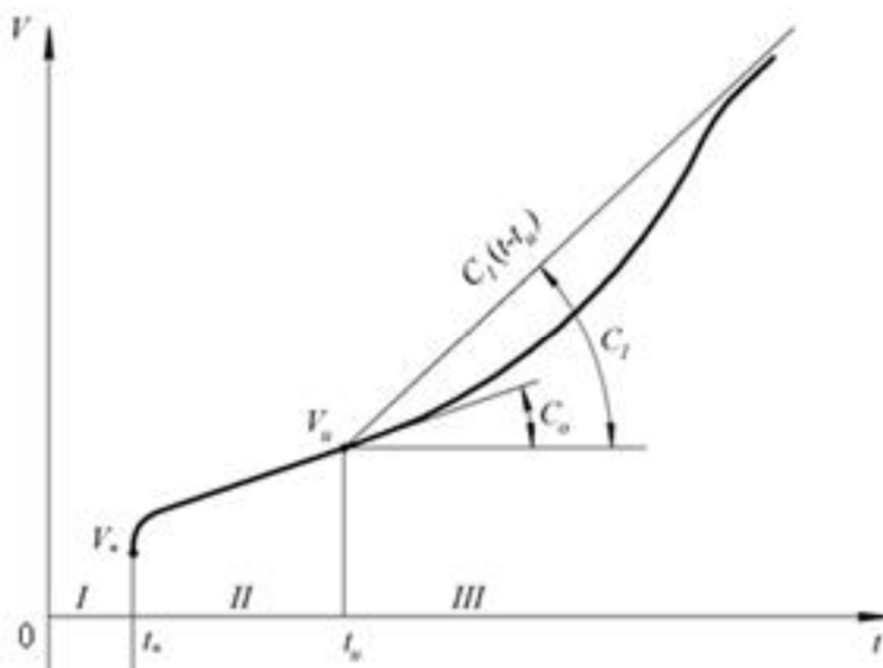


Рис. 1.10. Крива кавітаційної ерозії(I – інкубаційний період, II – період кавітаційного зміцнення, III – період кавітаційного знеміцнення)

При гідродинамічній кавітації на поверхні деталі в області зниженого тиску із зародків кавітації, які присутні в будь-якій рідині, утворюються кавітаційні порожнини (бульбашки або каверни). Ці порожнини розподілені, як безпосередньо на поверхні деталі, так і на відстані від неї. При попаданні порожнин в область підвищеного тиску відбувається їх стиснення з утворенням мікро-течій, які механічно впливають на поверхню деталі у випадку схлопуванні бульбашки біля поверхні. При періодичному впливі цих мікро-течій відбувається винесення маси матеріалу з утворенням ерозійних лунок на поверхні, що призводить до поступового зносу деталі машини. Схематично цей механізм можна розглянути таким чином(рис. 1.11).



Рис. 1.11. Механізм кавітаційного руйнування деталі під впливом мікро-течії.

У зв'язку з цим є актуальним завдання розробки узагальненої математичної моделі кавітаційного зносу деталей, що враховує конструкторсько-технологічні особливості і режими експлуатації виробу, а також властивості зовнішньої гідродинамічної середовища і напружено-деформований стан деталі. Узагальнена математична модель дозволить попередньо відсортувати по кавітаційній стійкості досліджувані матеріали деталі і визначити режими випробувань деталей на доводочному етапі їх конструкторсько-технологічного проектування.

При схлопуванні кавітаційних бульбашок в точці  $O$ , над поверхнею на відстані  $r_0$  від неї (рис. 1.12) на ній утворюється пластичний кратер з пластичним ядром  $d$  під ним. Критичне розпушення  $\vartheta_{кр}$ , що приводить до утворення осередку руйнування глибиною  $z^*$ , утворюється за час інкубаційного періоду  $t^*$  після схлопування критичного числа бульбашок  $N^*$ . При цьому об'єм пошкодженого і видаленого з кратера матеріалу буде пропорційний  $(z^*)^3$ .  $p$  - тиск при схлопуванні бульбашок.

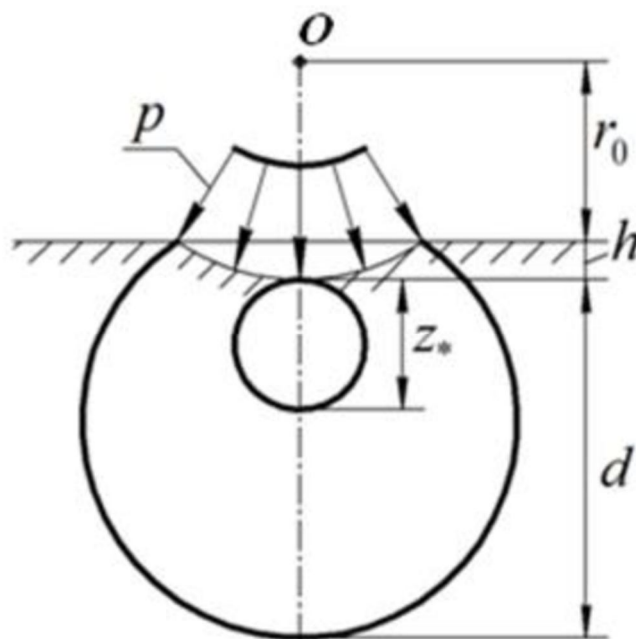


Рис. 1.12. Схема утворення осередку руйнування при кавітаційній ерозії

Величина  $z^*$  визначається за виразом:

$$z^* = d^* \left\{ 1 - \frac{1}{\gamma^*} \ln \left[ \left( \frac{C_0}{\lambda_T^s} \right)^{\frac{1}{s}} + 1 \right] \right\} \quad (1.10)$$

де  $\gamma^*$  – значення параметра  $\gamma$  при  $N^* = 1$ ;  $\gamma$  – параметр, пов'язаний з розмірами ядра  $d$  і глибиною кратера;  $d^*$  – значення  $d$  при  $N^* = 1$ ;  $C_0$  – стала Л. Коффіна;  $\lambda_T = 0,002$ ;  $s$  – стала матеріалу ( $s = 2$  в разі лінійного зміцнення).

Пропонована модель утворення ерозійних пошкоджень враховує пружні, пластичні і циклічні властивості матеріалу і дозволяє визначити тривалість інкубаційного періоду ерозії відповідно для стабільних матеріалів, а також матеріалів, що циклічно знеміцнюються та зміцнюються.

$$t^* = \tau \frac{C_0}{\lambda_T^s} * \frac{1}{\left[ \exp \gamma \left( 1 - \frac{z^*}{d} \right) - 1 \right]^s}$$

$$t^* = \tau \left\{ 1 + \frac{1}{s\beta} \ln \left[ 1 + s\beta \left( \frac{C_0}{\lambda_T^s} * \frac{1}{\left[ \exp \gamma \left( 1 - \frac{z^*}{d} \right) - 1 \right]^s} - 1 \right) \right] \right\}$$

$$t^* = \tau \left\{ 1 + \frac{1}{\omega} \left[ \frac{C_0}{\lambda_T^s} * \frac{1}{\left[ \exp \gamma \left( 1 - \frac{z^*}{d} \right) - 1 \right]^s} - 1 \right] \right\} \quad (1.11)$$

де  $\omega = (1 - s\varphi)^{-1}$ ;  $\varphi, \beta$  – коефіцієнти інтенсивності циклічного зміцнення і знеміцнення. У цих виразах  $\tau$  визначається конкретним типом і процесом кавітації в рідині. Для його визначення необхідно досліджувати процес з позицій гідромеханіки. Щоб оцінити кавітаційну стійкість матеріалу на стадії утворення ерозійних пошкоджень, як критерій використовуємо параметр

$$\overline{R^*} = \frac{E_t N^*}{(z^*)^3}, \text{ в якому } E_t - \text{енергія, що поглинається в осередку ерозії при}$$

схлопуванні бульбашки. Цей параметр еквівалентний питомій енергії, що



поглинається в одиниці об'єму, який видаляється з матеріалу за час інкубаційного періоду.

Для опису стадії розвитку ерозійних ушкоджень використовуємо співвідношення К. Стеллера про баланс роботи зовнішніх сил і виробленої роботи при сталій потужності, що витрачається на руйнування.

$$RV = Pt \quad (1.12)$$

де  $V$  – ерозійні втрати об'єму матеріалу за час  $t$ ;  $R$  – питома енергія, яка була поглинена в одиниці об'єму (ерозійний опір металу);  $P$  – потужність, що витрачається на руйнування.

Якщо задатися законами зміни опору ерозії  $R$  на стадії розвитку (інкубації) ерозійних пошкоджень, що складається з періодів зміцнення і знеміцнення, то отримаємо вирази, що описують процес ерозії в періоди зміцнення і знеміцнення відповідно

$$R = R^* + A(t - t^*)^\alpha$$

$$R = R_g \left[ 1 + \frac{1}{k} e^{k_p(t-t_u)} \right]$$

$$V = V^* + A_1(t - t^*)^{1-\alpha} \quad (1.13)$$

$$V = V_u + \frac{C_1(t - t_u)}{1 + \frac{1}{k} e^{-k_p(t-t_u)}}$$

де  $R^*$ ,  $V^*$  – ерозійний опір металу і первинні втрати об'єму в кінці інкубаційного періоду;  $A$ ,  $A_1$ ,  $C_1$  – постійні;  $\alpha$ ,  $k_p$  – коефіцієнти кавітаційного зміцнення і знеміцнення;  $k$  – коефіцієнт запасу ерозійного опору;  $t_u$ ,  $V_u$  – тривалість періоду зміцнення і втрати в його кінці (рис. 1.10);  $R_g$  – значення  $R$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Для оцінки ерозійної стійкості матеріалів на стадії розвитку кавітаційних ушкоджень пропонується параметр  $\bar{\delta}$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{P(t-t^*)} \int_{t^*}^t R dt \quad (1.14)$$

Використовуючи цей вираз з урахуванням попередніх залежностей та вважаючи, що  $t_u \gg t^*$ ,  $V_u \gg V^*$ ,  $t \gg t^*$ , отримуємо формули для визначення  $\bar{\delta}$  в періоди зміцнення і знеміцнення відповідно у вигляді

$$\bar{\delta} = \frac{t_u}{V_u} \left[ \frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1-\alpha} \left( \frac{t}{t_u} \right)^\alpha \right] \quad (1.15)$$

$$\bar{\delta} = \frac{t_u}{V_u} \left[ \frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^2} \left( \frac{t}{t_u} \right) + \frac{k}{(1+k)(1-\alpha)} \left( 1 - \frac{t_u}{t} \right) + \frac{1 - e^{-k_p(t-t_u)}}{k_p t (1-\alpha)(1+k)} \right]$$

Слід також зазначити, що попередні залежності, що описують розвиток ерозійних ушкоджень у часі, були отримані в припущенні сталості потужності  $P$ , що витрачається на руйнування. Однак в період знеміцнення, особливо при  $t \gg t_u$ , рідина, заповнюючи глибокі кавітаційні раковини, починає надавати буферну дію. Тому логічно припустити зменшення потужності  $P$ , яке висловимо залежністю

$$P_t = P e^{-\chi(t-t_u)} \quad (1.16)$$

де  $\chi$  – стала. Тоді, записуючи роботу зовнішніх сил як  $E_p = \int_{t_u}^t P_t dt$ , з рівняння балансу робіт для періоду кавітаційного знеміцнення отримаємо вираз для ерозійних втрат об'єму матеріалу в зазначеному періоді

$$V = V_u + \frac{c_1}{\chi} * \frac{1 - e^{-\chi(t-t_u)}}{1 + \frac{1}{k} e^{-k_p(t-t_u)}} \quad (1.17)$$

Зазначені вище критерії  $\bar{R}^*$  та  $\bar{\delta}$  були визначені на конструкційних сплавах Д16АТ, АМг61Гк, АМгАМ, Д1АТ, К48-2Т1, Д19АМ, Л63 і

12X18H10T. При цьому досліджувані матеріали виставлені в ряд кавітаційної стійкості. Поряд з цими критеріями проведена також широко використовувана традиційна оцінка по втратах маси. Положення матеріалів в цих рядах виявилось різним. Однак слід зазначити, що оцінка по вище розглянутим критеріям на думку автора є більш об'єктивною, оскільки в них враховується комплекс механічних властивостей матеріалів (пружних, пластичних, міцності, циклічних і тріщиностійкості). Це дослідження було запозичено з джерела [8].

Таким чином, при конструкторсько-технологічному проектуванні виробів, працюючих в умовах гідродинамічного навантаження, одним з основних завдань є підвищення їх кавітаційної стійкості. Для цього розробляють оптимальні конструкції деталей, наприклад, суперкавітуючі гребні гвинти, підбирають і розробляють кавітаційно-корозійностійкі матеріали, наприклад, композитні матеріали, в тому числі і на основі нановуглецевих структур, підбирають технологічні режими з метою отримання дрібнозернистої і однорідної структури матеріалу, оптимальної шорсткості поверхні деталі.

#### **1.4 Постановка задачі дослідження процесу взаємодії засміченої рідини з фільтроелементом**

Вхідними даними для моделі оцінки напружено-деформованого стану деталі є геометрія, властивості, швидкість і кут атаки мікротечії, частинки забруднювача, а також властивості матеріалу деталі (мішені) і зовнішнього середовища.

*Таблиця 3. Властивості технічних рідин, що піддаються фільтрації*

Властивості	Вода	Бензин	АМГ-10
Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	755	835
Швидкість звуку в середовищі $C$ , м/с	1500	1170	1290

Для розрахунку силової взаємодії рухомих частинок забруднювача з нерухомою поверхнею фільтроелементу, що деформується, доцільно використовувати методику, в основанні якої лежить розв'язок контактної задачі Герца. Такий підхід може бути застосований для обчислення деформацій і напружень фільтроелементу з врахуванням енергії удару частинок забруднювача

## 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ЗАСМІЧЕНОЇ РІДИНИ З ФІЛЬТРОЕЛЕМЕНТОМ В УМОВАХ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КАВІТАЦІЇ

### 2.1 Фізичні властивості матеріалів

Як було зазначено вище, конструкція проточного ультразвукового кавітатора являє собою трубчатий резонансний вібратор, що працює на частоті радіальних коливань. Сам трубчатий вібратор – це відрізок труби з зовнішнім діаметром 75 мм і внутрішнім діаметром 62 мм. Джерелом коливань в даному випадку слугують чотири п'єзоелектричні приводи, зібрані за півхвильовою акустичною схемою із ступінчастим трансформатором швидкості, ступінь малої площі якого була ноже-видною і фіксувалася уздовж твірної на зовнішньої поверхні трубчастого вібратора. Резонансна частота коливань становить 22,2 кГц. Вібратор збуджується на нульовий моді коливань, тобто здійснює радіальні коливання. довжина труби вібратора становить 80 мм, що істотно менше половини довжини хвилі згинальних коливань по довжині труби. Тому під час роботи вся поверхня вібратора здійснює чисто радіальні коливання.

Конструкцію даного кавітатора можна схематично представити у наступному вигляді:

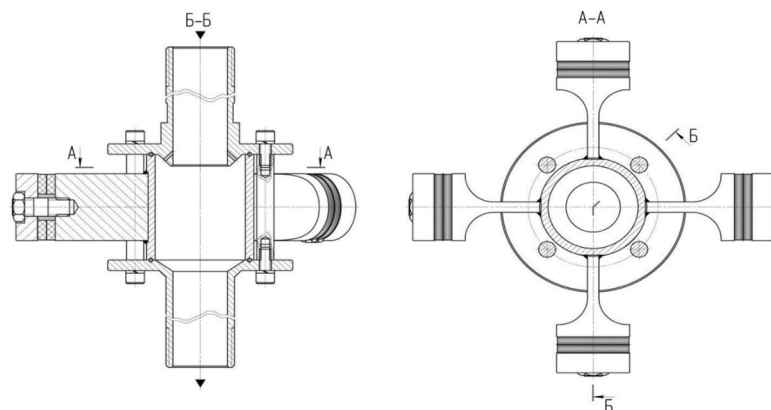


Рис. 2.1. Конструкція проточного ультразвукового кавітатора з чотирма вібраторами

Цільовим елементом в нашому випадку є циліндричний фільтрувальний елемент, розташований всередині даного приладу. Він являє собою циліндричну тонкостінну оболонку діаметром 60 мм, що має комірчасту структуру з розмірами комірки 20 мкм.

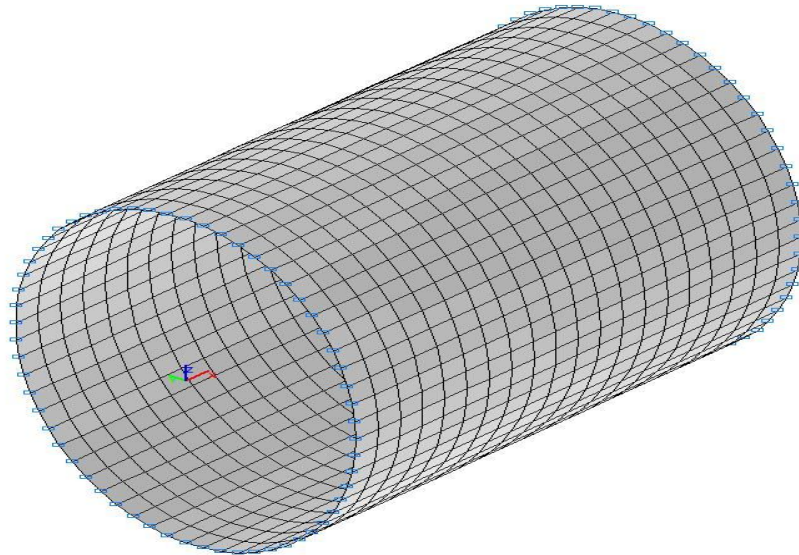


Рис. 2.2. Фільтрувальний елемент циліндричного типу, що знаходиться всередині кавітатора

Для спрощення розрахунків буде розглянуто фрагмент циліндричної оболонки фільтрувального елемента у вигляді вигнутого прямокутника, який приймає удар частинки забрудненої рідини, що отримує певне прискорення внаслідок схлопування кавітаційної бульбашки поблизу поверхні фільтроелемента.

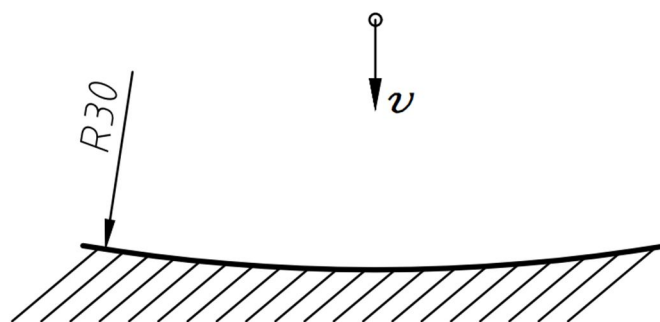


Рис. 2.3. Схематичне зображення процесу удару частинку забруднювача о поверхню фрагменту фільтроелемента

Для розрахунків були вибрані такі матеріали мішені: Д16АТ, АМг61Гк, і 12Х18Н10Т. Приймаємо, що вони ізотропні та пружно-пластичні. В якості рідини, що ударно взаємодіє з поверхнею фільтроелементу виступають вода, бензин та машинне мастило АМГ-10. Механічні та фізичні властивості даних матеріалів, що необхідні для розрахунків описані у таблиці нижче.

Таблиця 4. Механічні та фізичні властивості вибірки матеріалів для досліджень

Матеріал	$\sigma_{\epsilon}$	$\sigma_m$	$E$	$KCU$	$\rho$	$\nu$	$HB$
--	МПа	МПа	МПа	кДж/м <sup>2</sup>	Кг/м <sup>3</sup>	-	МПа
Д16АТ	480	350	$0,72 \cdot 10^5$	0,3	2800	0,3	420
АМг61Гк	355	190	$0,71 \cdot 10^5$	0.2	2640	0,33	650
12Х18Н10Т	529	225	$1,98 \cdot 10^5$	0,0215	7900	0,28	1790

Тут  $\sigma_{\epsilon}$  – границя міцності,  $\sigma_m$  – границя пропорційності,  $E$  – модуль пружності,  $KCU$  – ударна в'язкість,  $\rho$  – густина,  $HB$  – твердість по Брінеллю.

Характеристики рідин були наведені у попередньому пункті.

## 2.2 Задача Герца з урахуванням динамічного впливу

Для розрахунку силової взаємодії кавітаційних потоків, що утворилися після схлопування кавітаційних бульбашок, які в свою чергу з'явилися із зародків кавітації на місцях рухомих частинок забруднювача з нерухомою поверхнею фільтроелементу, що деформується, доцільно використовувати методику, в основанні якої лежить розв'язок контактної задачі Герца. В нашому випадку буде врахований динамічний вплив частинки рідини(краплі) на поверхню фільтроелементу при зіштовхуванні на великій швидкості. Такий підхід може бути застосований для обчислення деформацій і напружень фільтроелементу з врахуванням енергії удару частинок забруднювача та часу взаємодії[11].

Насправді, під час взаємодії твердої частинки забруднювача з нерухомою стінкою відбувається удар і напруження, які виникають в цей час, можуть бути значно більші ніж межа пружності. Вони концентруються на незначній поверхні та діють лише протягом частки секунди. При розрахунку задачі Герца допускають, що при статичному навантаженні в тілах відбуваються лише пружні деформації.

Ударну взаємодію частинки забруднювача з поверхнею нерухомої стінки по нормалі до поверхні можна представити згідно рис. 2.3. Тобто, частинка забруднювача рухається як жорстке тіло з дуже великою швидкістю  $v > 1000 \text{ м/с}$ , кут між напрямом руху і площиною поверхні  $\phi$  твердої стінки, що деформується, складає майже  $90^\circ$ . Частинка діє на нерухому поверхню з силою  $F$ , яку можна представити у вигляді нормальної сили  $F_n$  та сили тертя  $F_T$ .

При збільшенні сили удару частинки забруднювача до поверхні фільтроелементу контактні напруження збільшуються і можуть досягати границі міцності. Згідно роботи [12], руйнування твердої стінки відбувається за умови, якщо напруження на контактуючій поверхні перевищує  $K_\delta \sigma_\delta$ , де  $\sigma_\delta$  – границя міцності матеріалу твердої стінки;  $K_\delta$  – коефіцієнт динамічності при ударному навантаженні.

$$K_\delta = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{2g\delta_{\text{ст}}}} \quad (2.1)$$

Для розрахунку глибини занурення частинок забруднювача в нерухому поверхню фільтроелементу необхідно розв'язати систему рівнянь з теорії механіки суцільного середовища про вдавлювання жорсткої сфери у деформівний напівпростір. Через складність розрахунку ударних хвиль деформації, задачу зводимо до розв'язання системи рівнянь для однієї з множини частинок ударної взаємодії частинки забруднювача та нерухомої стінки [13].



В якості початкових умов приймалося, що в момент часу  $t = t_0$  швидкість руху частинки забруднювача сферичної форми масою  $m_c$  та радіусом  $r_c$  дорівнює  $V_0$ , швидкість переміщення нерухомої поверхні тіла фільтроелементу масою  $m_m$ , яке обмежене напівпростором (рис.1) дорівнює нулю. Відомі пружні характеристики матеріалів частинки забруднювача та фільтроелементу – модулі пружності  $E_1, E_2$  та коефіцієнти Пуассона  $\nu_1, \nu_2$ . Границя міцності матеріалу поверхні фільтроелементу  $\sigma_s$  менше ніж границя міцності матеріалу частинки забруднювача. Взаємодія відбувається під кутом, близьким до нормалі нерухомої поверхні.

Виходячи з початкових умов, розрахунок змінних параметрів сили удару проводився для моментів часу, які визначалися послідовною зміною часу взаємодії на величину приросту  $\Delta t$ . Усі розрахунки продовжувалися до початку зворотного руху частинки забруднювача  $t_1$ , а згодом до закінчення взаємодії  $t_2$ . Час взаємодії визначався залежністю

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (2.2)$$

Припустимо, що ударна взаємодія частинки забруднювача та матеріалу нерухомої поверхні фільтроелементу відбувається в момент часу  $t_0$ . Також в цей момент будь-які види напруженого стану в обох тілах відсутні. Через приріст часу  $\Delta t$ , тобто в момент часу  $t_1 = t_0 + \Delta t$  в контактуючих тілах утворюються просторово локалізовані зони напружено-деформованого стану обсягами  $\delta_1$  та  $\delta_2$ , обумовленими сферами радіусами  $r = v_{yв} \cdot t_1$ . Це дає змогу розрахувати маси деформованого об'єму матеріалу в частинці та в тілі фільтроелементу за формулами:

$$m_\delta = \rho_m \cdot \pi (v_{yв} \cdot t)^3, \text{ при } m_\delta < m_m$$

$$m_\delta = m_m, \text{ при } m_\delta > m_m \quad (2.3)$$

де:  $\rho_m$  – щільність матеріалу фільтроелементу,  $\text{кг/м}^3$  ;  $v_{yв}$  – швидкість поширення ударної хвилі,  $\text{м/с}$ ;  $m_\delta$  – маса деформованого тіла,  $\text{кг}$ . Саме закон збереження енергії став основою побудови математичної моделі. Передбачається, що кінетична енергія руху частинки забруднювача при контакті з нерухомою поверхнею фільтроелементу переходить в енергію пружної деформації його матеріалу, тертя на контактних поверхнях та енергію ударних хвиль, що поширюються по частинці забруднювача та нерухомій поверхні. Тому доцільно буде записати

$$E_{k1} = E_{y1} + E_{y2} + E_{тр} + E_{п2} + E_{в1} + E_{в2} \quad (2.4)$$

де:  $E_{k1}$  – кінетична енергія частинки забруднювача;  $E_{y1}$ ,  $E_{y2}$  – енергія пружних деформацій частинки забруднювача та нерухомої поверхні;  $E_{тр}$ ,  $E_{п2}$  – втрати енергії на тертя, пластичні деформації та інші види втрат;  $E_{в1}$ ,  $E_{в2}$  – хвильова енергія частинки забруднювача та фільтроелементу, яка визначається об'ємами, що охоплені ударною хвилею.

Співвідношення між енергією хвилі деформації та пружною деформацією раніше досліджувалось в роботі [14]. Результати показують, що в кожній окремій хвилі енергія пружних деформацій дорівнює кінетичної енергії хвилі, але при накладенні декількох хвиль стиснення і розтягування цей баланс порушується, оскільки по-різному підсумовується енергія. В той час, коли хвиля відбивається від вільної поверхні тіла, хвиля стиснення додається до відбитої хвилі і нерухома поверхня звільняється від енергії деформацій. Як результат, кінетична енергія частинок подвоюється. Однак, при відбитті хвилі деформації від жорсткої, локально zdeформованої стінки, все відбувається навпаки, тобто енергія деформацій подвоюється за рахунок розвантаження частинок тіла від кінетичної енергії. Такі процеси, а саме, повне розвантаження і подвоєння деформацій, можуть відбуватися тільки для тіл простої форми, наприклад, стрижня. Якщо тіла складної форми, то збільшення енергії пружної деформації за рахунок енергії хвилі відбувається лише

частково. Підсумувавши все вище зазначене, слід підкреслити, що величина поверненої хвильової енергії пропорційна енергії пружної деформації.

Для подальших розрахунків даної моделі будемо враховувати тільки часткове повернення первинної хвилі деформації стиснення і розтягування. Всі інші хвилі, які формуються в тілах в результаті проходження первинних хвиль, враховувати не будемо. Рівняння передачі енергії в цьому випадку можемо записати у вигляді [12]:

$$E_{k1}(1 - k_v \eta) = E_{тр} + E_{п2} \quad (2.5)$$

де:  $k_v$  – коефіцієнт збільшення пружної деформації за рахунок енергії хвилі, який змінюється у межах від 1,5 до 2,0;  $\eta$  – коефіцієнт передачі кінетичної енергії

$$\eta = \frac{E_{упр}}{E_{k1}} \quad (2.6)$$

де  $E_{упр}$  – енергія пружної деформації частинки забруднювача та фільтроелементу, Дж.

Щоб визначити поле напружень ударно взаємодіючих тіл, потрібно записати закон розподілу енергії в процесі удару. Для визначення співвідношення між кількістю енергії, що витрачається на формування пружних (оборотних) деформацій у взаємодіючих тілах, та кількістю енергії, яка необхідна для формування пластичних (необоротних) деформацій, використовувались закони збереження енергії імпульсу. Тому ударну взаємодію можемо описати наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{m_q v^2}{2} = \frac{2}{\eta} \left( \frac{m_q u_1^2}{2} + \frac{m_\delta u_1^2}{2} \right) \\ m_q (\vec{v} - \vec{u}_1) = \vec{F}_{cp} \cdot \Delta t \\ -m_\delta \vec{u}_2 = \vec{F}_{cp} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (2.7)$$

де:  $m_\delta$ ,  $m_\chi$  – маса частинки забруднювача та деформованого тіла, охоплених хвилями деформації, в момент часу  $t$ , кг;  $v$  – швидкість частинки забруднювача до удару, м/с;  $u_1$ ,  $u_2$  – швидкості мас  $m_\chi$  і  $m_\delta$  після удару, м/с;  $F_{cp}$  – середнє зусилля, яке діє в інтервалі часу  $\Delta t$ , Н.

Дана система рівнянь має такі невідомі параметри, як:  $\eta$ ,  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $F_{cp}$ . Для визначення коефіцієнта передачі кінетичної енергії можна скористатися наступним виразом:

$$\eta = \frac{2F_{y_{cp}} \cdot \Delta h_y}{m_\chi v^2} \quad (2.8)$$

де:  $F_{y_{cp}}$  – середнє зусилля пружних деформацій в інтервалі часу  $\Delta t$ , Н;  $\Delta h_y$  – приріст пружної деформації за час  $\Delta t$ , м.

Середнє зусилля за час  $\Delta t$  деформації фільтроелементу визначається залежністю:

$$F_{y_{cp}} = \frac{F_y(h_y - h_y) + F_y(h_y)}{2} \quad (2.9)$$

де  $h_y$  – пружна деформація.

В рамках одного кроку за час  $\Delta t$  визначаються всі параметри, що входять в систему рівнянь (2.7) в наступному порядку.

Визначаються значення сили пружної взаємодії в контакті. Значення  $F_y$  розраховується при кожному значенні  $t_i$ . Кожен раз уточнюється значення коефіцієнта відновлення –  $\eta$ . У формулу підставляється значення, отримане на попередньому кроці по часу. В якості початкового значення при розрахунку можна прийняти  $\eta_1 = 1$ .

Із системи рівнянь (2.7) далі при кожному значенні часу  $t_i$  знаходяться швидкості частинки забруднювача та нерухомої поверхні після удару:

$$u_{2i} = \frac{F_{y_{cp}} \cdot \Delta t}{m_{\delta i}}$$

$$u_{1i} = \frac{F_{y_{cp}} \cdot \Delta t}{m_{\chi i}} \quad (2.10)$$

Для визначення сили за період часу  $\Delta t$  удару сполучених тіл використовувалася теорія контактної взаємодії Герца. При розрахунках поля напружень, що змінюються з плином часу, необхідно використовувати рівняння, яке встановлює зв'язок між силою,  $F_{y_{cp}}(\Delta t)$  що діє на поверхнях контакту двох тіл, які піддаються взаємному стисненню та загальною деформацією  $\Delta h(\Delta t)$ .

Розрахунок пружних деформацій в процесі ударної взаємодії тіл крім рівнянь Герца враховує закони передачі кінетичної енергії та імпульсу. При цьому, при розв'язанні система рівнянь (2.7), (2.9) доповнена умовою

$$F_{cp} = F_{y_{cp}}(\Delta h) \quad (2.11)$$

Розв'язок системи рівнянь відносно невідомих параметрів дозволяє визначити величину приросту пружної деформації  $\Delta h_y$  за період часу  $\Delta t$ . Виходячи з формули Герца, значення пружної деформації обчислювалося за формулою:

$$h_y = {}^{1/1.5} \sqrt{\frac{F_{y_{cp}}}{k_n}} \quad (2.12)$$

$$\text{де } k_n = 1.33\sqrt{r} \frac{E_1 E_2}{(1-\nu_1^2)E_2 + (1-\nu_2^2)E_1}$$

Загальна пружна деформація за час удару  $t$  визначалася підсумовуванням приростів.

$$h_y = \sum_{i=1}^n \Delta h_{yi} \quad (2.13)$$

## 2.3 Метод скінченних елементів

Для розв'язку даної задачі Герца буде використовуватися метод скінченних елементів(MCE) за допомогою програмного комплексу ANSYS Mechanical Workbench, а конкретно модуля Explicit Dynamics(розрахунок та математичне моделювання динаміки ударів, вибухів та зіштовхувань) та модуля Fluids(розрахунок та моделювання динаміки потоків рідин та газів).

Метод скінченних елементів у базовому вигляді являє собою розв'язок системи диференціальних рівнянь з частковими похідними, для визначення значень функції на границях елементів(вузлах), які в свою чергу з механічної точки зору можуть бути реакціями, моментами, напруженнями або переміщеннями. Тобто розв'язки такої системи формують напружено-деформований стан(НДС) всієї конструкції, що і потрібно визначити в нашій задачі.

Типова інженерна задача в MCE починається з підготовки моделі - віртуального аналога реальної конструкції, технологічного виробу, деталі механізму і т. д.

З геометричної точки зору, розрахункова модель являє собою поле точок, пов'язаних між собою примітивами (відрізками прямих ліній, трикутниками, прямокутниками і ін.). Ці примітиви і є так званіми скінченними елементами. Існує велика кількість різних скінченних елементів, але в основному вони класифікуються за розмірністю, тобто: стрижневі, плоскі, об'ємні та спеціальні(моделюють не геометрію, а певні умови, наприклад пружно-податливі зв'язки, жорстке тіло, нуль-елементи) елементи. Так утворюється сітчаста структура - геометрія вихідної конструкції апроксимується накладеної на неї сіткою і подальша робота здійснюється вже не з вихідною системою, а з отриманої сіткою.

Окрім геометрії, примітиви, що з'єднують вузлові точки моделі, мають також відомі механічні властивості. Це означає, що зв'язавши жорсткості всіх елементів сітки в єдине ціле (в рамках прийнятих в моделі припущень), можна

встановити напружено-деформований стан всієї системи. Так розраховувач може отримати будь-які данні, що його цікавлять – поздовжні і поперечні сили, згинальні і крутильні моменти, напруження, деформації та ін.

Кількість вузлів і елементів, з яких складається розрахункова модель, заздалегідь відома. Для деяких складних систем вона може вимірюватися тисячами і навіть мільйонами, але вона, так чи інакше, скінченна. Цей фактор, а також те, що заздалегідь відомий принцип "роботи" кожного окремого елемента системи, породило назву - метод скінченних елементів. А саму сітку називають, як правило, скінчено-елементною.

З математичної точки зору, область, в якій шукається рішення системи диференціальних рівнянь МСЕ, розділяється на підобласті (елементи) і для кожного елемента вибирається апроксимуюча функція довільного виду. Найбільш простий і "грубий" випадок - поліном першого ступеня: поза елементом обрана функція дорівнює нулю, а на границях (у вузлах) функція приймає значення, які є рішенням задачі. Звичайно, вони заздалегідь невідомі. Коефіцієнти полінома апроксимуючої функції знаходять з умов рівності значень сусідніх функцій у вузлах.

Далі складається система лінійних алгебраїчних рівнянь, в яких число невідомих дорівнює числу ступенів свободи системи (в загальному випадку, це шестикратна кількість вузлів сітки). Розміри сітки обмежуються не тільки конкретним завданням, а й фізичними можливостями комп'ютера (в першу чергу, розміром доступної пам'яті).

У науковій і технічній літературі теорія методу кінцевих елементів викладається через матричне числення. Етапи, описані вище, обов'язково містять збір матриць жорсткості і мас конструкції. Матриця жорсткості є таблицею, в якій записані вузлові реакції кінцевого елемента на почергове одиничне зміщення кожного його вузла в напрямку кожної окремої степені свободи. Висловлюючись простіше, матриця жорсткості кінцевого елемента - це система взаємозв'язків всіх його точок на "механічному" рівні. Така

матриця будується базуючись на локальній системі координат окремого скінченного елемента. Знаючи локальну матрицю жорсткості кожного окремого елемента, комп'ютерна програма (CAE) формує глобальну матрицю жорсткості, підсумовуючи жорсткості всіх елементів, що стикаються в спільних (суміжних) вузлах, з урахуванням їх орієнтації в просторі. На математичному рівні програма перемножує кожен локальну матрицю жорсткості на відповідну їй матрицю напрямних косинусів (матриця, що відображає кути повороту кожного вузла елемента в локальній системі координат відносно глобальної). У підсумку виходить загальна система взаємозв'язків між усіма вузлами розрахункової моделі.

На зібрані матриці згодом накладаються граничні умови (тобто враховуються закріплення системи, опори). Інженер також задає навантаження, що моделюють вплив на конструкцію зовнішніх сил, після чого отримана система лінійних алгебраїчних рівнянь вирішується тим чи іншим методом. Якщо МСЕ реалізується в формі методу переміщень, то результатом рішення є переміщення кожного вузла конструкції. За знайденими вузловими переміщеннями можуть бути знайдені інші фактори напружено-деформованого стану.

## **2.4 Математична постановка задачі**

Для розрахунків використовується модель фрагменту фільтрувального елемента у вигляді вигнутого тонкостінного прямокутника. Для задання крайових умов фрагмент жорстко закріплюється по периметру виключаючи будь-які переміщення у просторі, імітуючи жорстке защемлення даного фрагменту всередині всього циліндричного елемента фільтрувальної перегородки. Для моделі задаються властивості матеріалу для трьох випадків різних досліджуваних матеріалів.

Розв'язком задачі являється значення інтенсивності внутрішніх сил, що виникають при ударі краплі рідини по поверхні фрагменту, тобто напруження,



деформації та її розподілення. Для спрощення розрахунків нехтуємо силами інерції, що виникають при динаміці удару.

## **3 ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ**

### **3.1 План обчислювального експерименту**

Як було сказано вище, за основу обчислювального експерименту взята контактна задача Герца з врахуванням коефіцієнту динамічності. Тому основні маніпуляції можна розділити на 2 частини: розрахунок НДС фрагменту фільтроелементу під дією сили тяжіння частинки забруднювача та перерахунок НДС базуючись на результатах першого розрахунку, враховуючи коефіцієнт динамічності. Складемо повний план експерименту по пунктам:

- 1) Постановка контактної задачі Герца з урахуванням динамічного навантаження.
- 2) Моделювання НДС при статичному навантаженні під дією сили тяжіння частинки забруднювача.
  - a. Побудова геометрії досліджуваного фрагменту та частинки рідини.
  - b. Задання матеріалів та їх властивостей.
  - c. Побудова скінчено-елементної сітки моделі.
  - d. Задання навантажень та крайових умов.
  - e. Розрахунок системи
- 3) Перерахунок НДС з урахуванням коефіцієнта динамічності.
- 4) Визначення максимальних напружень, абсолютних деформацій та об'єм деформованого матеріалу.
- 5) Порівняльний аналіз результатів обчислювального експерименту для різних матеріалів.
- 6) Висновки.

### **3.2 Моделювання НДС при статичному навантаженні під дією сили тяжіння частинки забруднювача.**

На початку експерименту були задані основні параметри системи, такі як матеріали з їх властивостями та геометрію системи. В програмне середовище ANSYS Workbench були підключені 3 модулі компонентів для задання

матеріалів Engineering Data, кожний з яких включав набір з двох матеріалів: матеріал для досліджуваного фрагменту та матеріал для частинки забруднювача(для кожного випадку однаковий). Також були підключені 2 модулі компонентів для геометрії Geometry, для двох варіантів геометрії частинки забруднювача(10 та 100 мкм)

Геометрія будувалася у вбудованому середовищі для побудови геометрії Design Modeler, та мала такі параметри: довжина та ширина фрагменту 5 на 5 мм, товщина 2 мм, радіус кривизни 30 мм, діаметр частинки забруднювача 0.1 та 0.01 мм для двох варіантів геометрії відповідно.

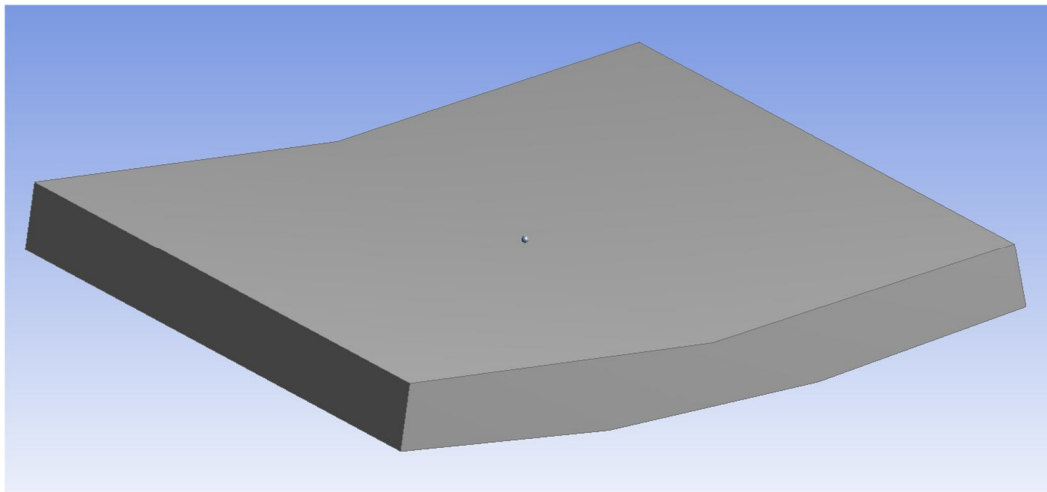


Рис. 3.1. Геометрія фрагменту фільтроелементу та частинки забруднювача, побудована у середовищі DesignModeler

Наступною задачею була побудова скінчено-елементної сітки для кожної геометрії з урахуванням точки контакту, у якій потрібно було зробити згущення сітки для більш точних розрахунків. Для цього був використаний параметр сітки Sphere of Influence, який встановлює заданий розмір скінченного елемента всередині сфери заданого радіусу. Для запобігання різкого перепаду розмірів СЕ було послідовно використано 3 таких сфери з різними діаметрами та різними параметрами СЕ всередині.

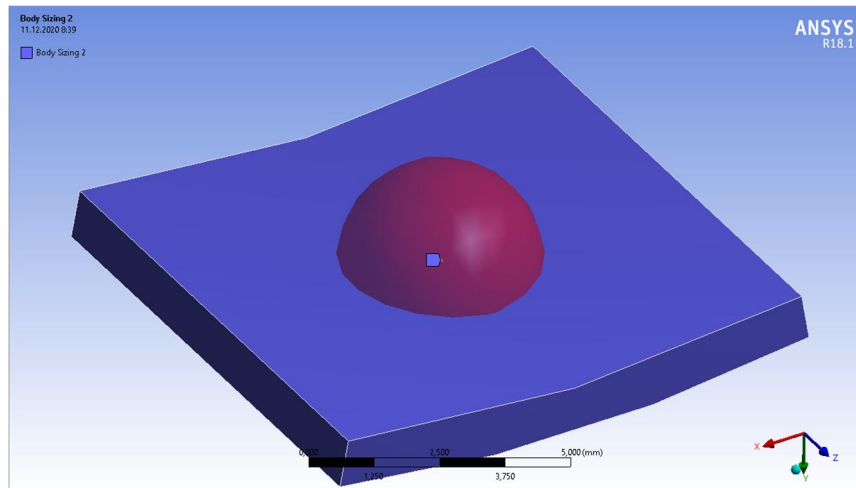


Рис. 3.2. Ілюстрація графічного задання параметрів Sphere of Influence у середовищі ANSYS Mechanical

Для побудови сітки для розміру частинки забруднювача 100 мкм були використані такі параметри:

- Загальний розмір СЕ 0.5 мм, тип – тетраєдричний скінченний елемент.
- Перша сфера впливу: радіус – 2 мм, розмір СЕ – 0.3 мм.
- Друга сфера впливу: радіус – 1 мм, розмір СЕ – 0.1 мм.
- Третя сфера впливу: радіус – 0.3 мм, розмір СЕ – 0.05 мм.

З такими параметрами отримали сітку з 131486 тетраєдричних елементами та 183636 вузлами. Загальний вигляд сітки показаний на рис. 3.3.

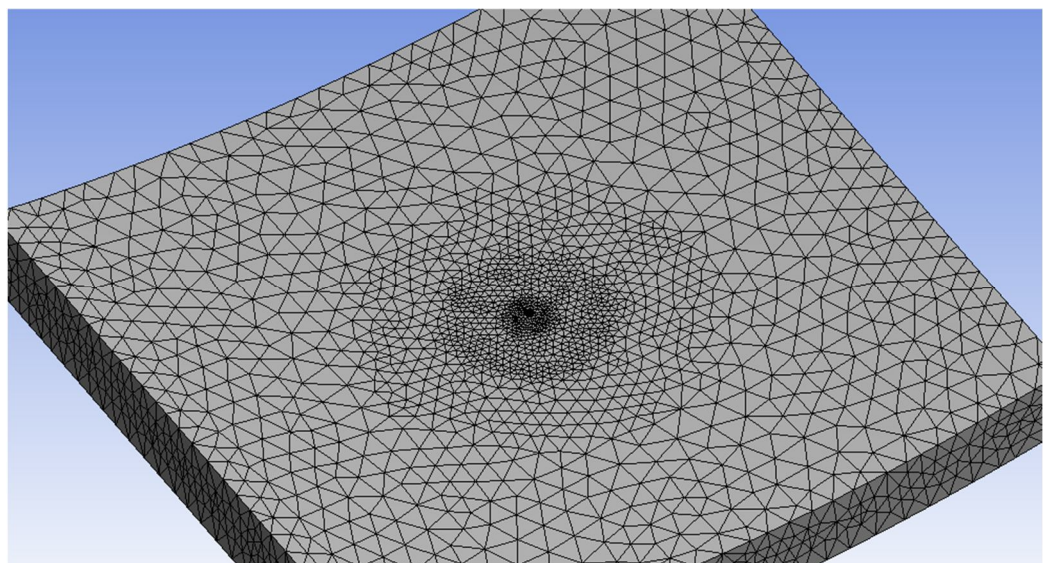


Рис. 3.3. Зовнішній вигляд скінчено-елементної сітки для випадку з частинкою забруднювача діаметром 100 мкм

Для випадку з діаметром частинки забруднювача 10 мкм були задані інші параметри сітки з більшим згущенням в точці контакту.

- Загальний розмір СЕ 0.5 мм, тип – тетраєдричний скінченний елемент.
- Перша сфера впливу: радіус – 1.5 мм, розмір СЕ – 0.15 мм.
- Друга сфера впливу: радіус – 0.5 мм, розмір СЕ – 0.07 мм.
- Третя сфера впливу: радіус – 0.05 мм, розмір СЕ – 0.006 мм.

З такими параметрами отримали сітку з 227762 тетраєдричних елементами та 314513 вузлами.

Statistics		Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	183636	<input type="checkbox"/> Nodes	314513
<input type="checkbox"/> Elements	131486	<input type="checkbox"/> Elements	227762

Рис. 3.4. Статистика скінчено-елементної сітки у середовищі ANSYS Mechanical

Після побудови сітки були задані умови закріплення і навантаження фрагменту фільтроелементу. Для імітації защемлення зі сусідніми фрагментами було використано жорстке защемлення по торцях фрагменту(Fixed Support). В якості діючої сили виступає сила тяжіння частинки забруднювача, що була прикладена в центрі мас частинки та напрямлена вертикально вниз(Remote Force). Значення цієї сили обраховуємо за наступною формулою:

$$F = mg = \rho V g = \rho g \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \quad (3.1)$$

Для двох діаметрів частинки забруднювача отримуємо дві еквівалентні сили тяжіння для подальших розрахунків.

$$F_{10} = \rho g \left( \frac{4}{3} \pi r_{10}^3 \right) = 7200 \cdot 9.8 \cdot \frac{4}{3} \cdot 3.14 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^3 = 3.69 \cdot 10^{-11} H$$

$$F_{100} = \rho g \left( \frac{4}{3} \pi r_{100}^3 \right) = 7200 \cdot 9.8 \cdot \frac{4}{3} \cdot 3.14 \cdot (50 \cdot 10^{-6})^3 = 3.69 \cdot 10^{-8} H$$

Силовa схема системи показана на рис. 3.5.

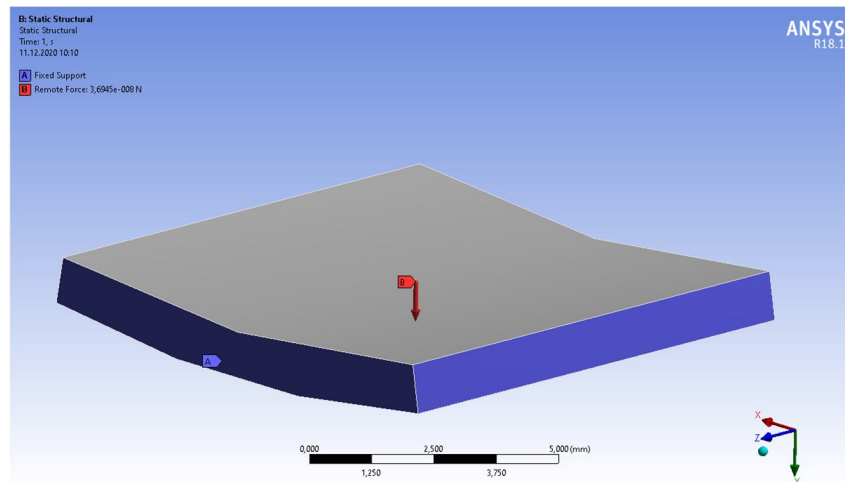


Рис. 3.5. Силовa схема системи навантаження фрагменту фільтроелемента силою тяжіння, прикладеною до центра мас частинки забруднювача

Для подальших розрахунків коефіцієнту динамічності потрібно визначити максимальні деформації, що виникають при дії сили тяжіння на частинку забруднювача. Для цього в полі вибору наборів результатів вибираємо Total Deformation(Загальні деформації) та запускаємо розрахунок кнопкою Solve.

В результаті отримаємо 6 результатів для 3 матеріалів та 2 діаметрів частинки забруднювача. На рис. 3.6, 3.7 та 3.8 показані розподіли деформацій у розрізі для всіх 6 розрахункових схем. Точні значення максимальних деформацій зведені у таблиці 5.

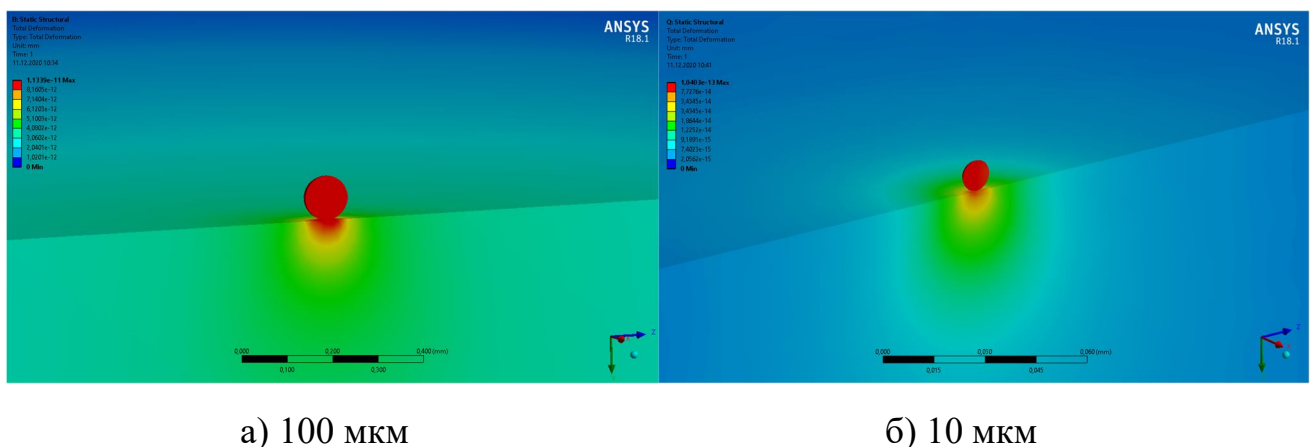
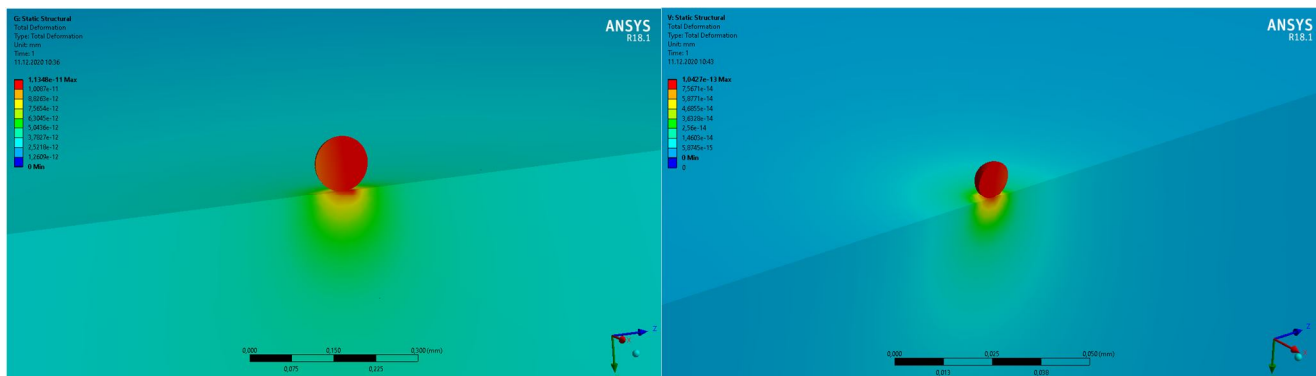


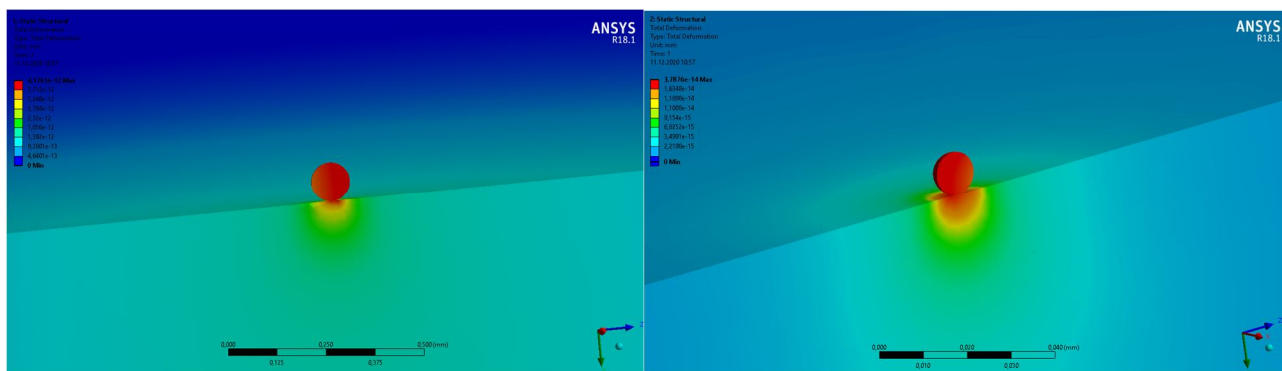
Рис. 3.6. Розподіл загальних переміщень для матеріалу Д16АТ при відповідних діаметрах частинки забруднювача



а) 100 мкм

б) 10 мкм

Рис. 3.7. Розподіл загальних переміщень для матеріалу АМг61гк при відповідних діаметрах частинки забруднювача



а) 100 мкм

б) 10 мкм

Рис. 3.7. Розподіл загальних переміщень для матеріалу 12X18H10T при відповідних діаметрах частинки забруднювача

Таблиця 5. Значення максимальних переміщень при дії сили тяжіння

	Д16АТ	АМг61гк	12X18H10T
100 мкм	1,0781e-11 мм	1,0802e-011 мм	3,9831e-012 мм
10 мкм	8,6796e-014 мм	8,7672e-014 мм	2,6957e-014 мм

### 3.3 Розрахунок коефіцієнтів динамічності для різних швидкостей руху частинки

Для розрахунків коефіцієнтів динамічності використовуємо наступну формулу:

$$K_{\text{д}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{2g\delta_{\text{ст}}}} \quad (3.2)$$

де  $v$  – швидкість руху частинки забруднювача,  $\delta_{\text{ст}}$  – максимальне переміщення при статичному навантаженні,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Так як в імітаційній моделі застосовуються 3 різних рідини, то для кожної рідини маємо відповідно 3 швидкості руху частинки забруднювача. Прийmemo швидкість руху частинок рівною швидкості звуку в середовищі, так як максимальна швидкість частинки забруднювача не може перевищувати швидкість звуку.

Використовуючи результати розрахунків попереднього пункту а також значення швидкостей частинок забруднювача для трьох рідин визначимо значення коефіцієнтів динамічності для всіх випадків.

Для випадків руху частинки забруднювача у воді  $v_1 = 1500 \text{ м/с}$ :

$$K_{\text{д1}}^{(100)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_1^2}{2g\delta_{\text{ст1}}^{(100)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1500^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 1,0781 \cdot 10^{-14}}} = 3,26 \cdot 10^9$$

$$K_{\text{д2}}^{(100)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_1^2}{2g\delta_{\text{ст2}}^{(100)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1500^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 1,0802 \cdot 10^{-14}}} = 3,26 \cdot 10^9$$

$$K_{\text{д3}}^{(100)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_1^2}{2g\delta_{\text{ст3}}^{(100)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1500^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 3,9831 \cdot 10^{-15}}} = 5,37 \cdot 10^9$$

$$K_{\text{д1}}^{(10)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_1^2}{2g\delta_{\text{ст1}}^{(10)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1500^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 8,6796 \cdot 10^{-17}}} = 3,64 \cdot 10^{10}$$

$$K_{\text{д2}}^{(10)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_1^2}{2g\delta_{\text{ст2}}^{(10)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1500^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 8,7672 \cdot 10^{-17}}} = 3,62 \cdot 10^{10}$$



$$K_{д3}^{(10)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_1^2}{2g\delta_{ст3}^{(10)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1500^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 2,6957 \cdot 10^{-17}}} = 6,53 \cdot 10^{10}$$

Для випадків руху частинки забруднювача у бензині  $v_2 = 1170$  м/с:

$$K_{д1}^{(100)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_2^2}{2g\delta_{ст1}^{(100)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1170^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 1,0781 \cdot 10^{-14}}} = 2,55 \cdot 10^9$$

$$K_{д2}^{(100)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_2^2}{2g\delta_{ст2}^{(100)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1170^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 1,0802 \cdot 10^{-14}}} = 2,54 \cdot 10^9$$

$$K_{д3}^{(100)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_2^2}{2g\delta_{ст3}^{(100)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1170^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 3,9831 \cdot 10^{-15}}} = 4,19 \cdot 10^9$$

$$K_{д1}^{(10)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_2^2}{2g\delta_{ст1}^{(10)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1170^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 8,6796 \cdot 10^{-17}}} = 2,84 \cdot 10^{10}$$

$$K_{д2}^{(10)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_2^2}{2g\delta_{ст2}^{(10)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1170^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 8,7672 \cdot 10^{-17}}} = 2,82 \cdot 10^{10}$$

$$K_{д3}^{(10)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_2^2}{2g\delta_{ст2}^{(10)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1170^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 12,6957 \cdot 10^{-17}}} = 5,09 \cdot 10^{10}$$

Для випадків руху частинки забруднювача в АМГ-10  $v_3 = 1290$  м/с:

$$K_{д1}^{(100)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_3^2}{2g\delta_{ст1}^{(100)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1290^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 1,0781 \cdot 10^{-14}}} = 2,81 \cdot 10^9$$

$$K_{д2}^{(100)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_3^2}{2g\delta_{ст2}^{(100)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1290^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 1,0802 \cdot 10^{-14}}} = 2,80 \cdot 10^9$$

$$K_{д3}^{(100)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_3^2}{2g\delta_{ст3}^{(100)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1290^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 3,9831 \cdot 10^{-15}}} = 4,62 \cdot 10^9$$

$$K_{д1}^{(10)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_3^2}{2g\delta_{ст1}^{(10)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1290^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 8,6796 \cdot 10^{-17}}} = 3,13 \cdot 10^{10}$$

$$K_{д2}^{(10)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_3^2}{2g\delta_{ст2}^{(10)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1290^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 8,7672 \cdot 10^{-17}}} = 3,11 \cdot 10^{10}$$

$$K_{д3}^{(10)} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v_3^2}{2g\delta_{ст3}^{(10)}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{1290^2}{2 \cdot 9,8 \cdot 2,6957 \cdot 10^{-17}}} = 5,61 \cdot 10^{10}$$

Отримані результати зведені у таблицю 6.

Таблиця 6. Значення коефіцієнтів динамічності

Швидкість у середовищі	Матеріал	Діаметр частинки 100 мкм	Діаметр частинки 10 мкм
Вода $v_1 = 1500$ м/с	Д16АТ	3,26E+09	3,64E+10
	АМГ61ГК	3,26E+09	3,62E+10
	12Х18Н10Т	5,37E+09	6,53E+10
Бензин $v_2 = 1170$ м/с	Д16АТ	2,55E+09	2,84E+10
	АМГ61ГК	2,54E+09	2,82E+10
	12Х18Н10Т	4,19E+09	5,09E+10
АМГ-10 $v_3 = 1290$ м/с	Д16АТ	2,81E+09	3,13E+10
	АМГ61ГК	2,80E+09	3,11E+10
	12Х18Н10Т	4,62E+09	5,61E+10

Знаючи коефіцієнти динамічності можемо розрахувати сили, що еквівалентні динамічному навантаженню  $F_d = F_{ст} K_d$ . В результаті отримаємо 18 сил для кожного випадку. Результати обчислень зведені в таблицю 7.

Таблиця 7. Розрахункові еквівалентні сили, перераховані через коефіцієнти динамічності, Н

Середовище	Матеріал	Діаметр частинки 100 мкм	Діаметр частинки 10 мкм
Вода	Д16АТ	121	1,34
	АМг61гк	120	1,34
	12Х18Н10Т	198	2,41
Бензин	Д16АТ	94	1,05
	АМг61гк	93,9	1,04
	12Х18Н10Т	155	1,88
АМГ-10	Д16АТ	104	1,16
	АМг61гк	104	1,15
	12Х18Н10Т	171	2,07

### 3.4 Моделювання НДС фільтроелементу з урахування коефіцієнта динамічності

Оскільки ми знаємо еквівалентні сили, що були розраховані у попередньому пункті, можемо розрахувати НДС фрагменту фільтроелементу, що буде еквівалентний НДС фільтроелементу при динамічному розрахунку. За основу були взяті попередні розрахунки НДС для дії сили тяжіння, проте на цей раз ми отримаємо 18 результатів замість 6, для кожної розрахованої еквівалентної сили у відповідній конфігурації силової схеми системи.

На рис. 3.8 показана схема розрахунків всередині середовища ANSYS Workbench. Як видно на схемі, для кожної еквівалентної сили був використаний окремий розрахунковий модуль для розрахунків задач статичної (Static Structural). При чому так як для різних швидкостей руху частинки єдиним змінним параметром є еквівалентна сила, то для економії часу постановки задачі для кожного випадку, кожний наступний розрахунок

мав запозичені параметри з попередніх, такі як: геометрія, властивості матеріалів, скінчено-елементна сітка та силова схема (окрім значення сили).

Для визначення НДС фрагменту фільтроелементу в полі вибору результатів досліджень обираємо параметри Total Deformation(Загальні деформації) та Equivalent Stress von-Mises(Еквівалентні напруження за Мізесом), а також для визначення глибини проникнення частинки забруднювача обираємо Directional Deformation(Деформація за напрямком) для напрямку осі Y, так як ця вісь відповідає за товщину пластини. Отримані після розрахунків результати графічно зображені на рисунках нижче:

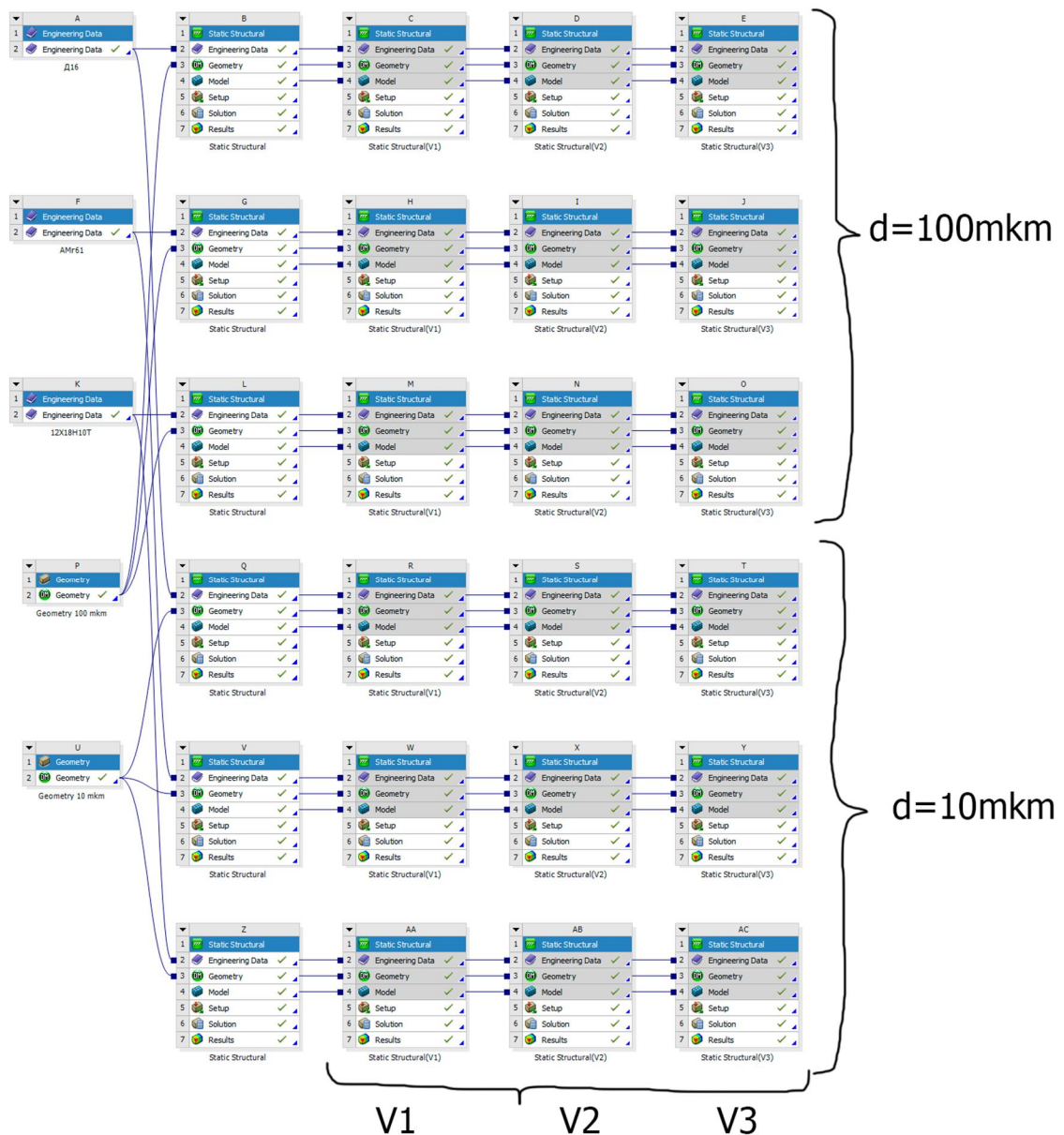
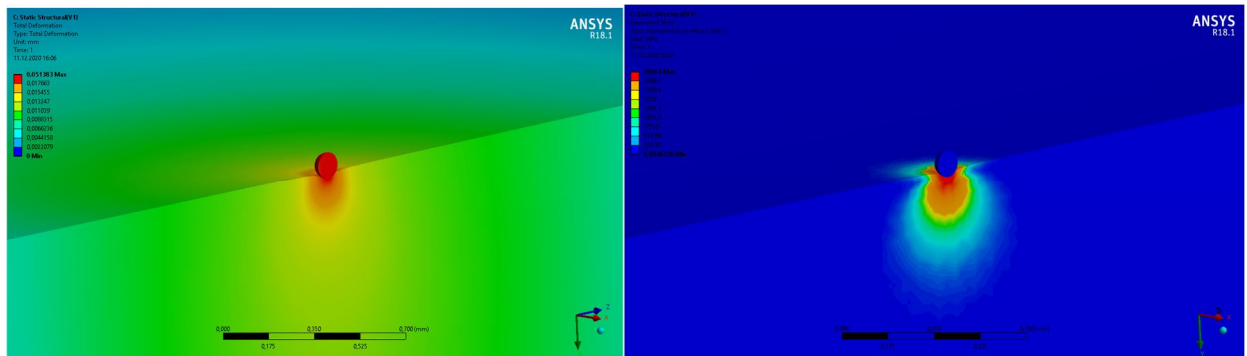


Рис. 3.8. Схематичний план розрахунків у середовищі ANSYS Workbench

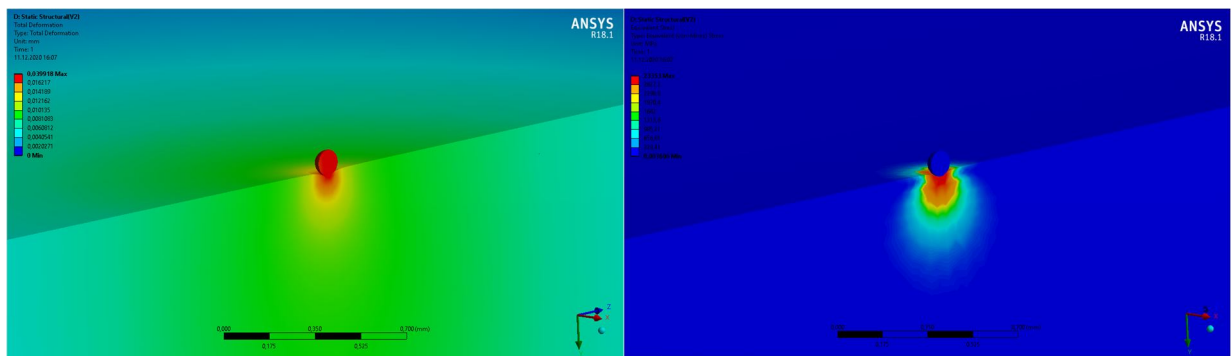
Для матеріалу Д16АТ та розміру частинки 100 мкм при різних швидкостях зіткнення отримуємо такі результати:



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

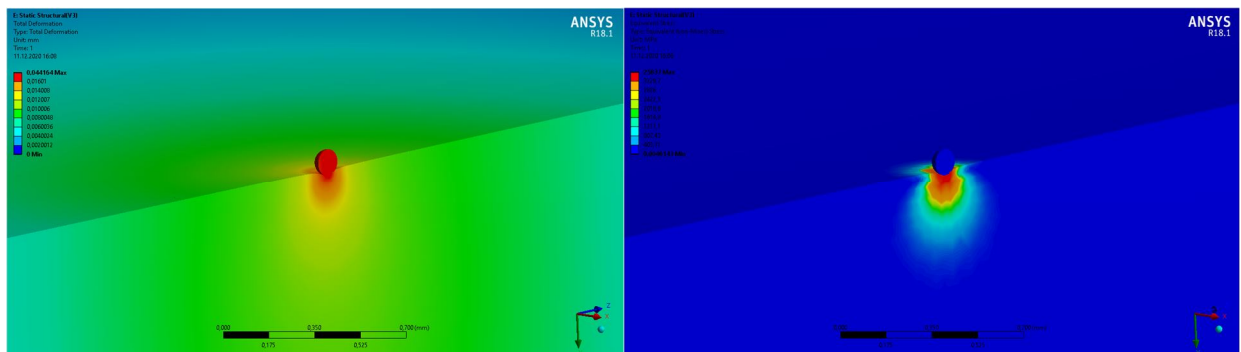
Рис. 3.9. НДС фрагменту фільтроелементу з Д16АТ, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 100 мкм на швидкості 1500 м/с(вода)



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.10. НДС фрагменту фільтроелементу з Д16АТ, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 100 мкм на швидкості 1170 м/с(бензин)

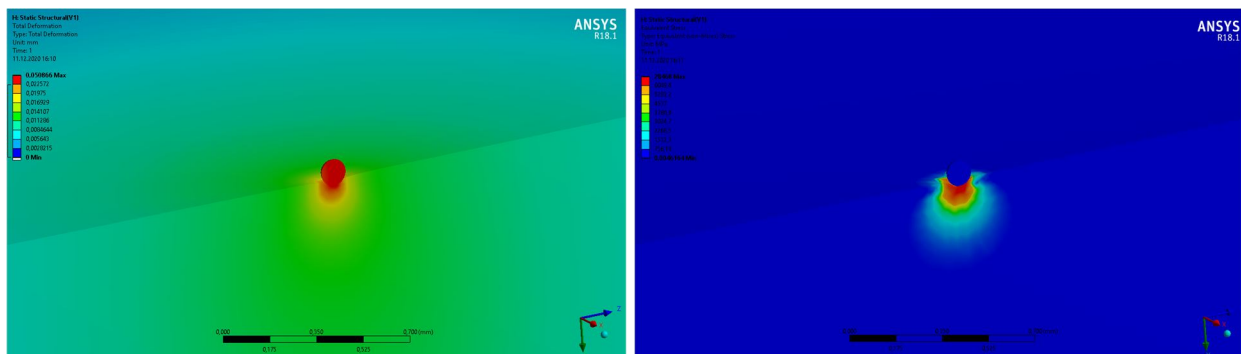


а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.11. НДС фрагменту фільтроелементу з Д16АТ, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 100 мкм на швидкості 1290 м/с(АМГ-10)

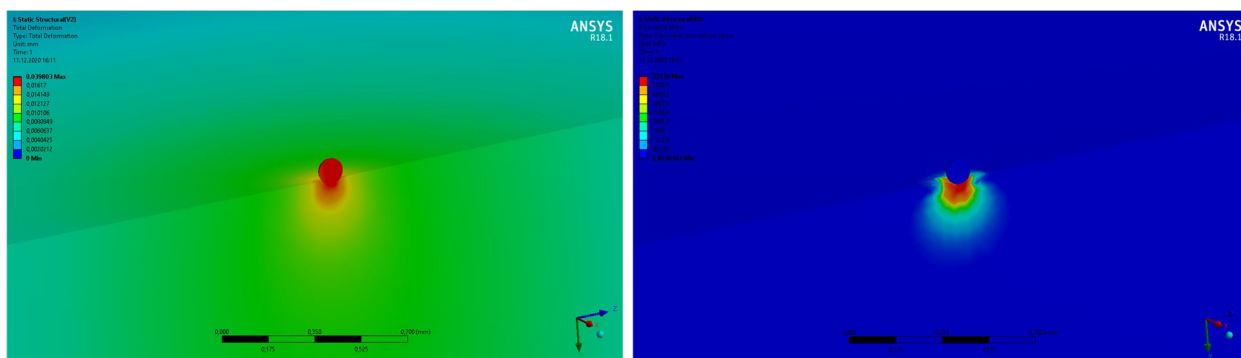
Для матеріалу АМг61гк та розміру частинки 100 мкм при різних швидкостях зіткнення отримуємо такі результати:



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

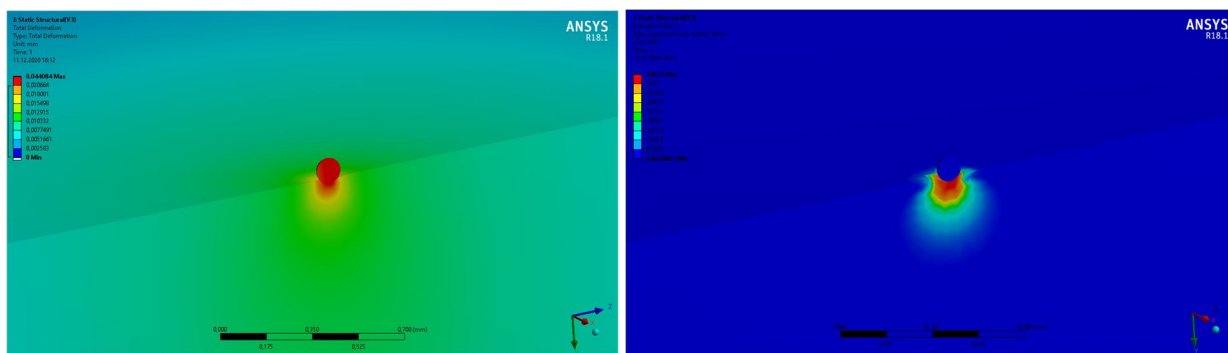
Рис. 3.12. НДС фрагменту фільтроелементу з АМг61гк, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 100 мкм на швидкості 1500 м/с(вода)



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.13. НДС фрагменту фільтроелементу з АМг61гк, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 100 мкм на швидкості 1170 м/с(бензин)

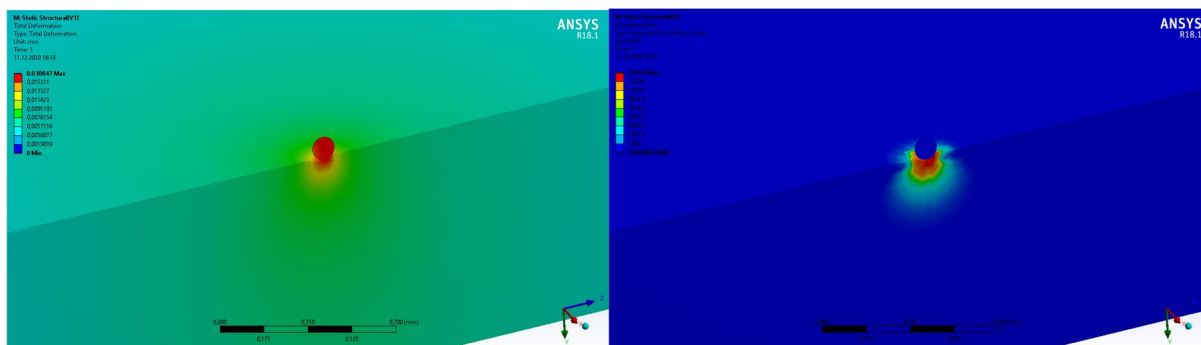


а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.14. НДС фрагменту фільтроелементу з АМг61гк, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 100 мкм на швидкості 1170 м/с(бензин)

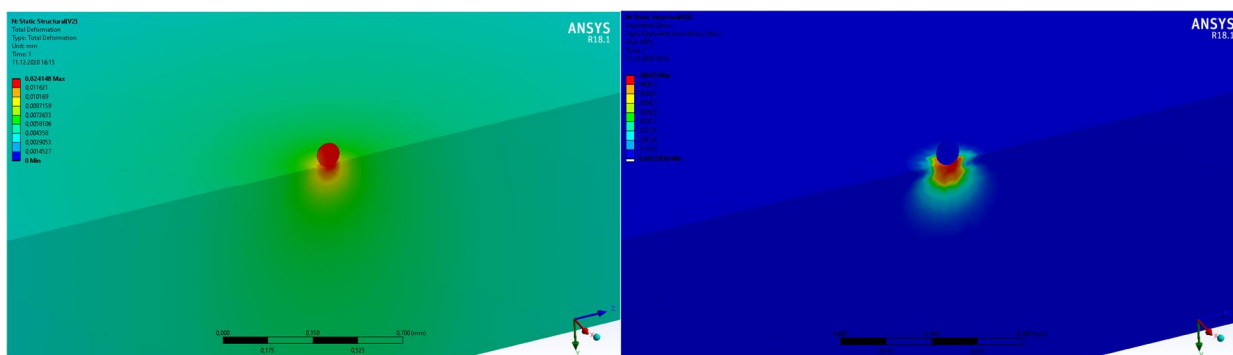
Для матеріалу 12X18H10T та розміру частинки 100 мкм при різних швидкостях зіткнення отримуємо такі результати:



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

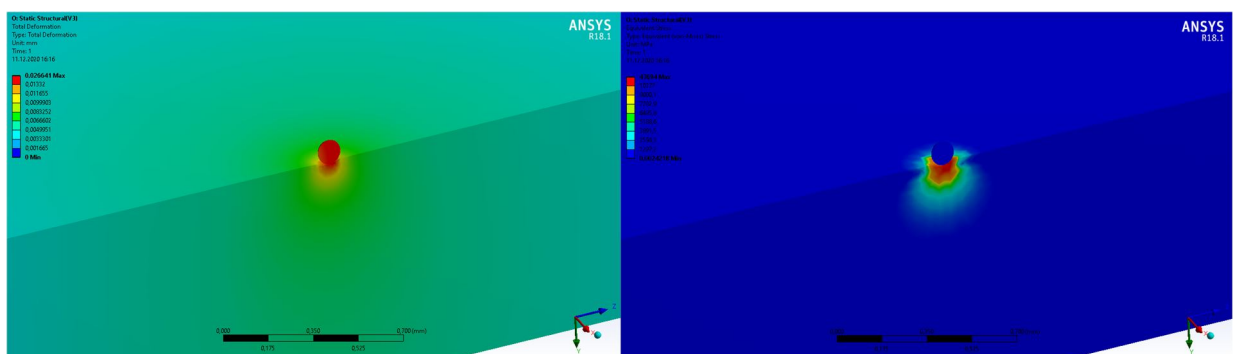
Рис. 3.15. НДС фрагменту фільтроелементу з 12X18H10T, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 100 мкм на швидкості 1500 м/с(вода)



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.16. НДС фрагменту фільтроелементу з 12X18H10T, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 100 мкм на швидкості 1170 м/с(бензин)

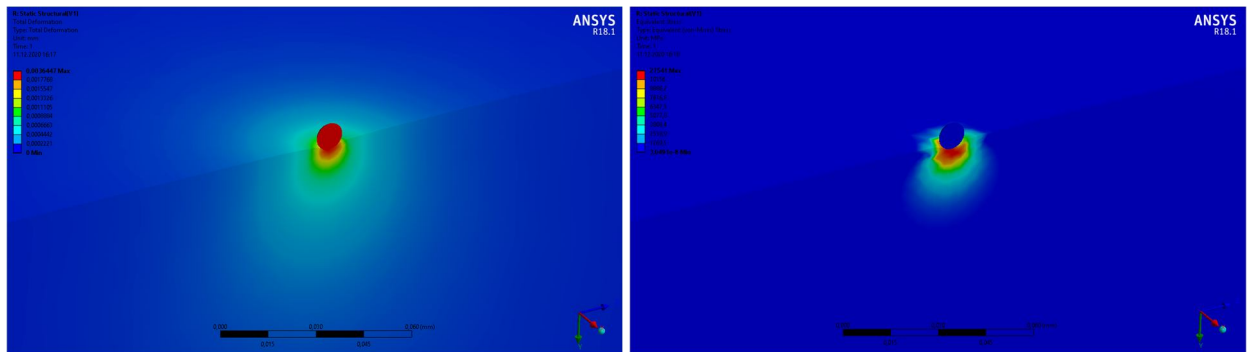


а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.17. НДС фрагменту фільтроелементу з 12X18H10T, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 100 мкм на швидкості 1290 м/с(АМГ-10)

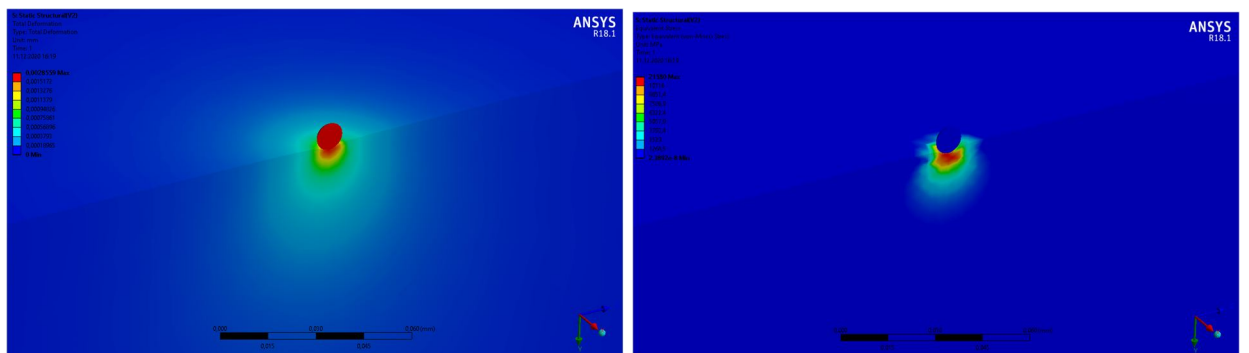
Для матеріалу Д16АТ та розміру частинки 10 мкм при різних швидкостях зіткнення отримуємо такі результати:



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

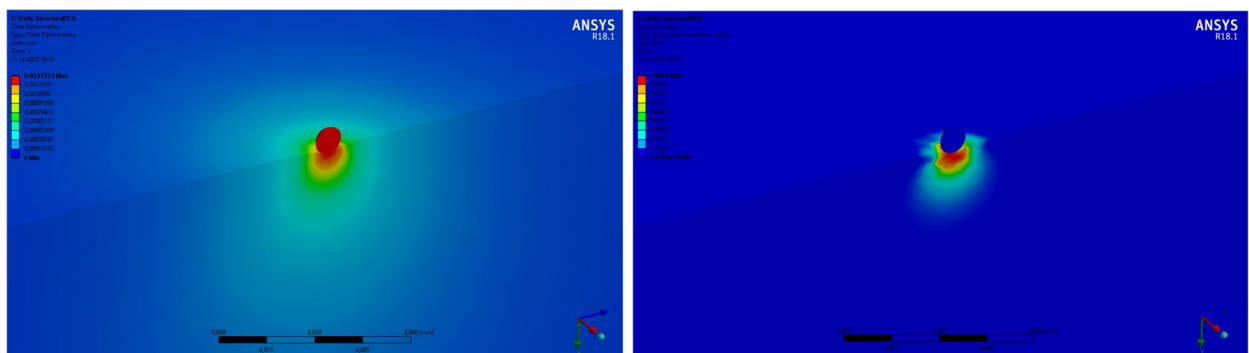
Рис. 3.18. НДС фрагменту фільтроелементу з Д16АТ, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 10 мкм на швидкості 1500 м/с(вода)



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.19. НДС фрагменту фільтроелементу з Д16АТ, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 10 мкм на швидкості 1170 м/с(бензин)



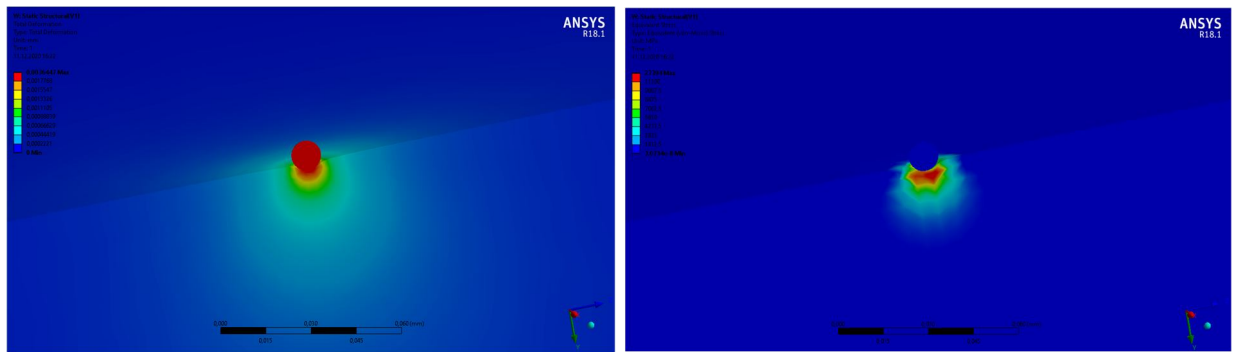
а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.20. НДС фрагменту фільтроелементу з Д16АТ, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 10 мкм на швидкості 1290 м/с(АМГ-10)



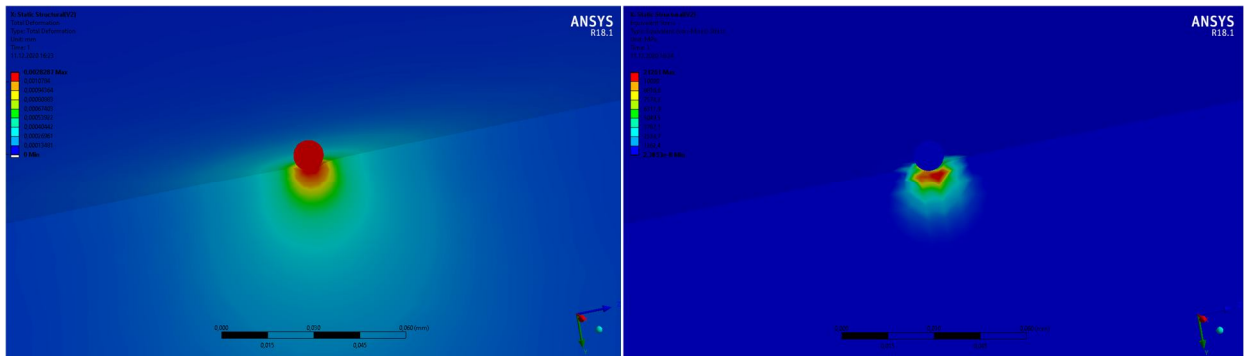
Для матеріалу АМг61гк та розміру частинки 10 мкм при різних швидкостях зіткнення отримуємо такі результати:



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

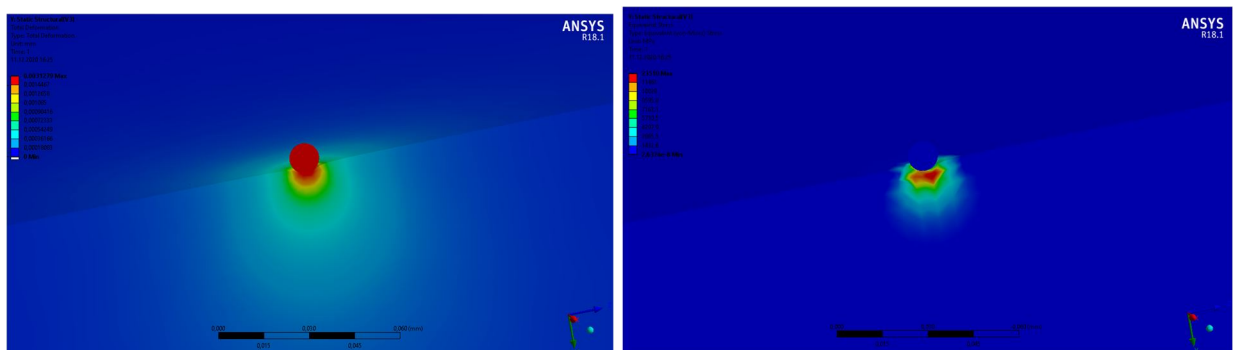
Рис. 3.21. НДС фрагменту фільтроелементу з АМг61гк, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 10 мкм на швидкості 1500 м/с(вода)



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.22. НДС фрагменту фільтроелементу з АМг61гк, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 10 мкм на швидкості 1170 м/с(бензин)

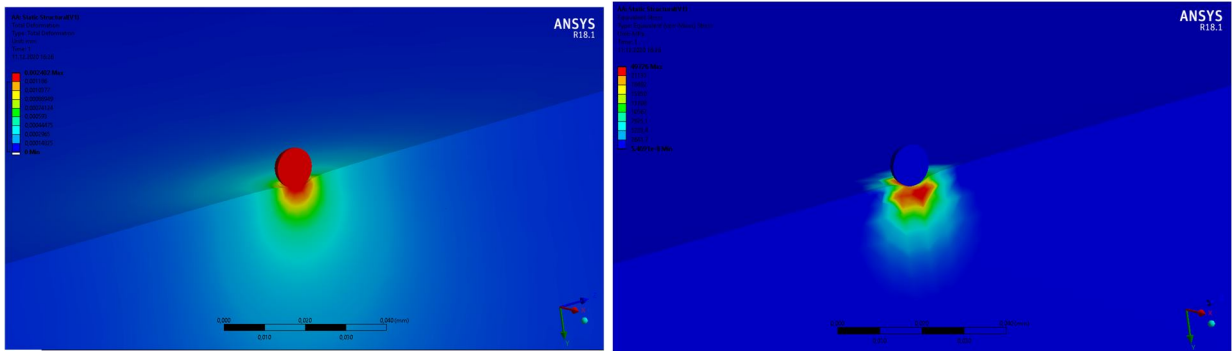


а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.23. НДС фрагменту фільтроелементу з АМг61гк, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 10 мкм на швидкості 1290 м/с(АМГ-10)

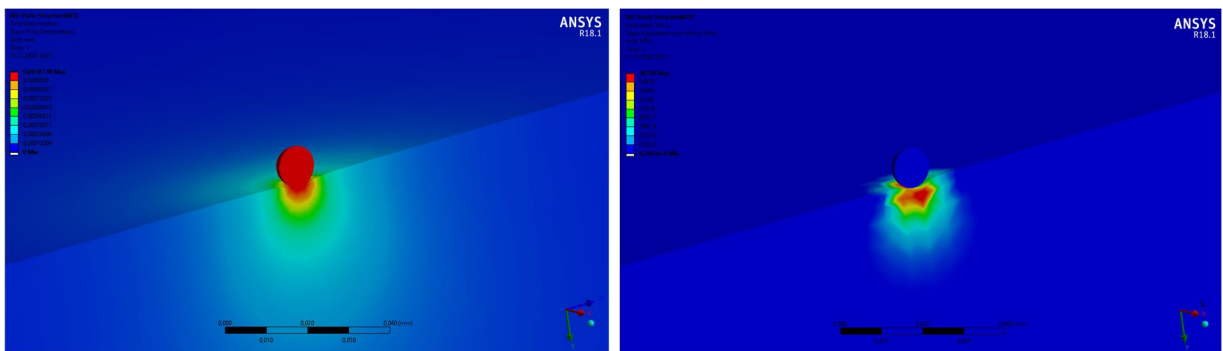
Для матеріалу 12X18H10T та розміру частинки 10 мкм при різних швидкостях зіткнення отримуємо такі результати:



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

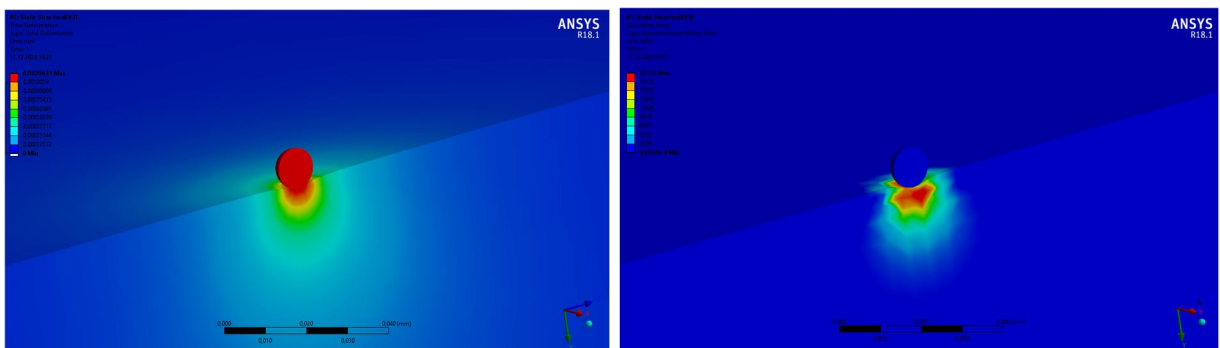
Рис. 3.24. НДС фрагменту фільтроелементу з 12X18H10T, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 10 мкм на швидкості 1500 м/с(вода)



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.25. НДС фрагменту фільтроелементу з 12X18H10T, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 10 мкм на швидкості 1170 м/с(бензин)



а) Загальні переміщення

б) Розподіл напружень за Мізесом

Рис. 3.26. НДС фрагменту фільтроелементу з 12X18H10T, при зіткненні частинки забруднювача діаметром 10 мкм на швидкості 1290 м/с(АМГ-10)

### 3.5 Аналіз результатів

Для отримання більш точних значень переміщень та напружень, використовуємо набір результатів Probe, що дозволяє вибрати об'єктом лише пластину, виключаючи саму частинку забруднювача. Таким чином отримали данні для подальшого аналізу. Отримані результати зведено у таблиці нижче.

Таблиця 8. Максимальні значення загальних переміщень, мм

Середовище	Матеріал	Діаметр частинки 100 мкм	Діаметр частинки 10 мкм
Вода	Д16АТ	4,1189e-002	3,2789e-003
	АМг61гк	4,0784e-002	3,2809e-003
	12Х18Н10Т	2,4726e-002	2,1604e-003
Бензин	Д16АТ	3,1998e-002	2,5693e-003
	АМг61гк	3,1913e-002	2,5464e-003
	12Х18Н10Т	1,9356e-002	1,6853e-003
АМГ-10	Д16АТ	3,5402e-002	2,8385e-003
	АМг61гк	3,5346e-002	2,8157e-003
	12Х18Н10Т	2,1354e-002	1,8556e-003

Таблиця 9. Максимальні значення напружень за Мізесом, МПа

Середовище	Матеріал	Діаметр частинки 100 мкм	Діаметр частинки 10 мкм
Вода	Д16АТ	30061	27541
	АМг61гк	28468	27394
	12Х18Н10Т	50593	49726
Бензин	Д16АТ	23353	21580
	АМг61гк	22276	21261
	12Х18Н10Т	39605	38790
АМГ-10	Д16АТ	25837	23841
	АМг61гк	24672	23510
	12Х18Н10Т	43694	42711

Таблиця 10. Максимальні значення переміщень за напрямком осі у  
(глибина проникнення частинки забруднювача), мм

Середовище	Матеріал	Діаметр частинки 100 мкм	Діаметр частинки 10 мкм
Вода	Д16АТ	4,1188e-002	3,2789e-003
	АМГ61ГК	4,0784e-002	3,2808e-003
	12Х18Н10Т	2,4726e-002	2,1604e-003
Бензин	Д16АТ	3,1997e-002	2,5693e-003
	АМГ61ГК	3,1913e-002	2,5463e-003
	12Х18Н10Т	1,9356e-002	1,6853e-003
АМГ-10	Д16АТ	3,5401e-002	2,8384e-003
	АМГ61ГК	3,5346e-002	2,8156e-003
	12Х18Н10Т	2,1354e-002	1,8556e-003

Знаючи глибину проникнення, можемо розрахувати об'єм матеріалу, що деформується після удару. Використовуємо відому формулу об'єму сегмента кулі.

$$V = \frac{\pi h^2}{3} (3r - h) \quad (3.3)$$

де  $h$  – висота сегменту, в даному випадку глибина проникнення по осі у.

Значення об'єму деформованого матеріалу зведені у таблицю 11.

Таблиця 11. Значення об'єму деформованого матеріалу, мм<sup>3</sup>

Середовище	Матеріал	Діаметр частинки 100 мкм	Діаметр частинки 10 мкм
Вода	Д16АТ	1,93E-04	1,32E-07
	АМг61гк	1,90E-04	1,32E-07
	12Х18Н10Т	8,02E-05	6,28E-08
Бензин	Д16АТ	1,27E-04	8,59E-08
	АМг61гк	1,26E-04	8,46E-08
	12Х18Н10Т	5,13E-05	3,96E-08
АМГ-10	Д16АТ	1,50E-04	1,03E-07
	АМг61гк	1,50E-04	1,01E-07
	12Х18Н10Т	6,14E-05	4,74E-08

Як видно за результатами досліджень, при порівняльному аналізі сталь 12Х18Н10Т зазнає значно менших деформацій. Незважаючи на великі напруження, що виникають в зоні контакту, цей матеріал можна ефективніше використовувати для виготовлення фільтроелементів. Як видно, напруження, що виникають у зоні контакту достатньо високі. Це можна пояснити надзвичайно маленькою площею контакту, так як розміри частинки забруднювача вимірюються у мікрометрах. При чому слід зазначити, що розмір частинки майже не впливає на виникаючі напруження, і навпаки менша частинка викликає навіть менші напруження, хоч і різниця не велика. Це можна пояснити тим, що частинка апроксимовано має форму кулі, і так як глибина проникнення дуже незначна, площа контакту майже не відрізняється у частинок 10 та 100 мкм.

Матеріали Д16АТ та АМг61гк майже не відрізняються по результатам. Це можна пояснити тим, що модулі пружності у цих матеріалів майже однакові, і незважаючи на велику різницю у допустимих напруженнях та їх відношеннях, ці матеріали ведуть себе аналогічно.

Отримані напруження на два порядки перевищують межі міцності матеріалів. З цього випливає, що удари частинки забруднювача руйнують поверхню фільтроелементу, і з кожним новим ударом вибивають з неї певний, хоч і невеликий, об'єм, що і призводить до ерозії матеріалу.

Щодо досліджуваних рідин, вони впливають на результат прямо-пропорційно швидкості звуку у них, але розбіжності невеликі, і можна зробити висновок, що даний фільтр можна використовувати для фільтрації багатьох рідин.

## 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 4.1 Концепція стартап-проекту

Компанія-стартап (від англійської to start up – заснувати) - це ризикове (венчурне) підприємство, що, як правило, є новоствореним бізнесом, який націлений на задоволення потреб ринку шляхом розробки життєздатної та функціональної бізнес-моделі товару, сервісу або платформи. Під запуском стартапу мається на увазі створення компанії на молодому або ще не існуючому ринку для ефективної розробки та перевірки масштабованої бізнес-моделі. Такі підприємства характеризуються високими показниками невдач, але в разі успіху (ринково успішними стають від 10% до 20%), стають великими та впливовими.

Головними характеристиками стратегії стартапу є інновативність, гнучкість, сучасність та плоска структура ієрархії. Метою цього розділу є оцінка ринкових перспектив і можливості комерціалізації отриманих результатів дослідження даної магістерської роботи. На рис. 4.1 зображено головні фактори успіху стартап-проекту.

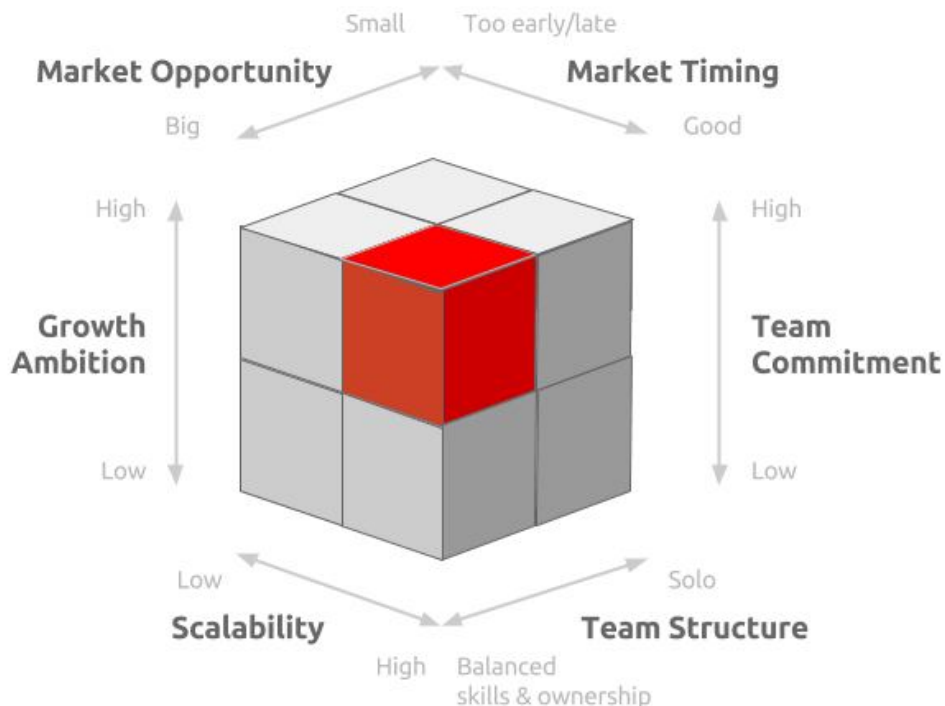


Рис. 4.1. Головні фактори успіху стартап-проекту

Більшість моделей опису розвитку стартапу поділяють етапи зростання компанії на посівну стадію (seed stage), стадію запуску (startup stage), стадію зростання (growth stage), стадію розширення (expansion stage) та стадію «виходу» (exit stage). Розроблена і представлена Стівеном Бланком модель розвитку заснована на визначенні та розумінні потреб клієнтів компанії. Ця модель описує чотири етапи, протягом яких стартап перетворюється в стабільну компанію:

1. «Виявлення споживачів», протягом якого стартап будує гіпотези про те, як його продукт вирішує проблеми потенційних клієнтів.
2. «Верифікація споживачів», тобто етап перевірки гіпотез і підготовки планів продажу, стратегії маркетингу, пошуку ранніх послідовників компанії. У разі невдачі на цьому етапі компанія повертається до стадії виявлення своїх споживачів.
3. «Залучення споживачів» після підтвердження корисності продукту компанії. Стартап переходить до продажу продукту та інвестиціям в маркетинг.
4. «Створення компанії» - кінцева мета стартапу, створення формальної структури компанії і бізнес-процесів для подальшого розвитку.

Цей підхід передбачає бережливе витрачання коштів і поступовий розвиток стартапу. На рис. 4.2 зображено основні фази розвитку стартап-проекту.



Рис. 4.2. Фази розвитку стартапу



Важливим кроком на початковій стадії розвитку стартап-компанії є розробка бізнес-плану проекту. Окрім визначення цілей щонайменше на три наступних роки та шляхів їх досягнення, бізнес-план також є документом, на який покладаються банки або інвестори, коли надають стартовий капітал стартапу.

Для того, щоб бізнес-план міг бути застосований як для зовнішніх цілей, так і як внутрішній інструмент планування та контролю роботи підприємства, має бути дотримана така структура:

- Короткий зміст: короткий або короткий портрет бізнес-моделі
- Презентація групи засновників або засновників
- Пояснення бізнес-ідеї (продукту або послуги)
- Огляд ринку / цільова група / можливості продажу
- Презентація маркетингової стратегії
- Організація бізнесу (юридична форма, місце розташування, персонал)
- Фінансовий план (щонайменше трирічне планування)
- SWOT аналіз (можливості / ризики)

#### **4.2 Аналіз можливості реалізації проекту**

В даній роботі було проведено аналіз НДС типової конструкції фільтроелементу при ультразвуковому силовому навантаженні, враховуючи різні типи рідин, що фільтруються, а також різні геометрії частинки забруднювача. Дане дослідження є базисом для розробки та виготовлення ультразвукових кавітаційних фільтрів з використанням матеріалу 12X18H10T, що відрізняється підвищеною ефективністю та довговічністю. У табл. 11. представлено ідею стартапу.

Таблиця 12. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для клієнта
Створення ультразвукових кавітаційних фільтрів з криогенної нержавіючої сталі 12X18Н10Т	Ультразвукові кавітаційні проточні фільтри підвищеної ефективності	Збільшення ефективності фільтрації та подовження терміну служби без додаткового обслуговування

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає [126]:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та збір інформації щодо значень техніко-економічних показників;
- проводиться порівняльний аналіз показників.

Для подання даної ідеї в якості основи для бізнес-моделі стартапу, варто зауважити деякі фактори, що можуть вплинути на вихід подібного стартапу на ринок.

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів [126].

Однією з головних особливостей стартап-проектів, що дають їм можливість успішно реалізуватися і вийти на ринок в якості готової бізнес-

моделі є наявність великої групи потенційних споживачів. Більшість успішних стартапів (Skype, Xing, ResearchGate, Tesla Motors, reddit, Airbnb, Dropbox, Asos) мали на меті задоволення потреб великої кількості клієнтів. Дослідження 101 невдалого стартапу показало, що основними причинами їх невдач є [128]:

1. Розробка продукту, який не має попиту у споживачів. (42%)
2. Бюджет був використаний до початку отримання доходів. (29%)
3. Команда не була спрацьована (психологічні причини). (23%)
4. Недостатня конкурентоспроможність (6%)

Таким чином, можна зробити висновок, що розробка та виробництво компонентів турбін не має на меті задовольнити потреби звичайних споживачів і тому така бізнес-модель не здатна масштабуватися. Головними споживачами для даної ідеї є відповідно компанії-виробники турбін. Відповідно, варто говорити про реалізацію даної ідеї у формі малого бізнесу, в якому ріст компанії є обмеженим і вона спрямована на обслуговуванні обмеженого кола клієнтів. У таблиці 13 представлено характеристики потенційних клієнтів стартап-проекту.

*Таблиця 13. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту*

<b>Потреба, що формує ринок</b>	<b>Цільова аудиторія</b>	<b>Відмінності у поведінці</b>	<b>Вимоги споживачів до товару</b>
Потреба у якісній фільтрації технічних рідин без постійного обслуговування та заміни зношених деталей	Компанії-виробники фільтрів високої очистки технічних рідин	Практична незасмічюємість	Стійкість до постійних ударних навантажень, підвищений строк служби, високі х-ки міцності, відносно недорога ціна матеріалу та виробничого процесу

Для подальшого дослідження стартап-проекту на основі даної дипломної роботи, необхідно провести огляд основних типів стартап-проектів. Загалом можна виділити такі категорії:

1. Розробка програмного забезпечення, застосунків та інтернет-платформ є найбільшою та найзручнішою сферою для стартап-проектів. Вона характеризується спрощеним процесом створення прототипу, і відповідно потребує меншого фінансування на перших етапах розробки. Подібні проекти здатні охопити дуже велику кількість клієнтів через наявність доступу до них через інтернет, тому здатні дуже швидко окупитися. Фінансування здійснюється здебільшого завдяки залученню приватних інвесторів та венчурних фондів. Окремою нішею є стартапи, спрямовані на забезпечення кібербезпеки. Прикладами є Skype, ResearchGate, Dropbox, BitSight Technologies, Freshdesk.
2. Створення продуктів - зазвичай мобільних пристроїв та аксесуарів в комплексі з програмним забезпеченням або застосунком, або інших товарів. Для такого типу стартапу дуже важливим є прототип продукту та запуск мало- та багатосерійного виробництва. Також є суттєвою собівартість продукту, так як вона регулює попит у споживачів. Окрім вже описаних вище двох видів фінансування, для нього характерне також фінансування через краудфандинг (crowdfunding), тобто через добровільні внески на одній з інтернет-платформ. Прикладами є FitBit, SolarCity, Tesla Motors, Ugears, Doppler Labs, Owlet Baby Care, Brandless, Mevics.
3. Проекти, що надають послуги- найменша галузь серед усіх стартап-розробок. Велика кількість подібних проектів направлена на сферу охорони здоров'я, тобто діагностику та лікування захворювань. Прикладом є Guardant Health, які пропонують своїм клієнтам, хворим на рак, провести аналіз крові для пошуку ДНК ракових клітин і таким

чином, прослідкувати перебіг хвороби і запропонувати відповідне лікування. Redwood Materials, DublDom також відносяться до стартапів такого типу.

Розробка ультразвукових кавітаційних фільтрів належить до другої категорії стартап-проектів, тому варто розглянути проблеми та аспекти, притаманні саме цій групі проектів. У таблиці 14 було проведено визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту. Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності [126].

*Таблиця 14. Сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту*

	<b>Техніко-економічні характеристики</b>	<b>Мій проект</b>	<b>Товари конкурентів</b>	<b>W</b>	<b>N</b>	<b>S</b>
1	Характеристики довговічності фільтру	Високі	Середні			+
2	Собівартість матеріалів	Висока	Середня	+		
3	Вартість виробництва	Середня (Заміна сировинного матеріалу не потребує великих змін у серійному виробництві)	Середня (налагоджене серійне виробництво)		+	
4	Універсальність	Вибраний матеріал дозволяє проводити фільтрацію агресивних середовищ а також очищення від більшості типів засмічень	Існуючі фільтри не забезпечують показників, необхідних для нормальної роботи в агресивних середовищах			+

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів [126].

Головними проблемами реалізації цієї ідеї є фінансування проекту на початкових етапах та пошуку ринку збуту. В контексті описаної категорії стартапу, ці проблеми є взаємопов'язаними.

По-перше, виробництво прототипу такого продукту потребує значних технологічних та фінансових ресурсів. Окрім виготовлення самого фільтроелементу потрібно також розробити та виготовити ультразвукові вібратори, що створюють ультразвукові хвилі. Також потрібно розробити електричну схему, що буде контролювати процес випромінювання УЗ хвиль, та дозволить оператору за необхідності вносити необхідні зміни у процес роботи. Сам фільтроелемент виготовляють методом прокатки та згинання листового матеріалу. Після цього проводиться груба, середня та фінальна обробки токарними та фрезерними інструментами, обвалення та шліфування поверхонь та лазерне буріння фільтрувальних отворів. На фінальній стадії мають бути нанесені захисні покриття [130]. Усі ці процеси потребують надзвичайної технологічної точності виконання, а необхідне устаткування не може бути покритим лише за рахунок власних фінансів розробника. Приклади подібних проектів, що направлені на невелику цільову групу клієнтів, та потребують великих об'ємів інвестицій ще на перших стадіях розробок, вже існують (найбільш відомою є SpaceX, стартовий капітал якої було зібрано за рахунок вже успішних інтернет-платформ Zip2 та PayPal). Проте для подібного виробництва високотехнологічних компонентів фільтрувальних установок власних інвестицій є недостатньо. Також є неможливим застосування краудфандинг-платформ через невідповідність їх аудиторії кінцевим споживачам продукту. Через це можливе фінансування

може бути здійснене тільки шляхом залучення інвесторів-виробників фільтрувальних систем.

По-друге, на даний момент, ринок фільтраційних систем є достатньо розвиненими і насиченими, що суперечить концепції стартап-проектів, згідно з якою їх створення та розвиток можливі лише на молодому або не існуючому ринку. При цьому, наявні на ринку компанії-виробники фільтрів виготовляють більшість компонентів власних силових установок самостійно, що значно ускладнює вихід стартапу на ринок. У таблиці 15 було проведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку.

*Таблиця 15. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку*

<b>Особливості конкурентного середовища</b>	<b>В чому проявляється дана характеристика</b>	<b>Вплив на діяльність підприємства</b>
Монополістична конкуренція	Існує декілька фірм конкурентів.	Підтримка якості продукту та постійні нововведення
За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний	Фірми-конкуренти знаходяться в інших країнах	Адаптація продукту як для вітчизняних так і для зарубіжних клієнтів.
За галузевою ознакою: зовнішньогалузева	Готовий продукт може використовуватися в інших галузях, що потребують очистки рідин	Постійне вдосконалення продукту
Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Види товарів однакові	Створити продукт, що враховує сильні і слабкі сторони конкурентів
За характером конкурентних переваг: нецінова	Вдосконалення протидій	Зниження ціни на продукт та підтримка його якості.
За інтенсивністю: марочна	Бренди існують і конкурують	Просування бренду, створення клієнтської бази

Таким чином, проведене в даній роботі дослідження, хоча і має велику практичну цінність та актуальність для великої кількості виробництв, що мають потребу в фільтруванні технічних рідин, не може бути основою для створення стартап-проекту. Подальша імплементація проекту не є доцільною, адже він не може знайти свою цільову аудиторію серед звичайних споживачів та потребує надзвичайно великих інвестицій вже на початку. Робота є передумовою для подальших досліджень матеріалів для фільтрів на основі кавітації, а також самих фільтрів у подальших проектах за підтримки компаній-виробників фільтрів.



## Висновки

Було поставлено задачу визначення напружено-деформованого стану фрагменту фільтроелементу під час процесу кавітації, що виникає під час ультразвукового фільтрування технічних рідин. Явище кавітації супроводжується постійними ударами частинок забруднювача по поверхні фільтроелементу, що викликає явище кавітаційної ерозії, яка і являлась основною проблемою для життєвого циклу фільтра. Метою було визначення оптимального матеріалу, що має кращі показники ударостійкості.

У першій главі був проведений літературний огляд процесу кавітаційної фільтрації, та описані основні його аспекти та фізичний зміст. Був проведений теоретичний аналіз фільтрів на основі ультразвуку, та визначені його характерні відмінності та порівняння з іншими методами. Описаний експеримент для дослідження явища кавітації, в ході якого була визначена основна проблема фільтрування рідини даним методом, а саме – кавітаційна ерозія. Були наведені теоретичні та експериментальні данні по поведінці частинок забруднювача в різних технічних рідинах при введенні в середовище ультразвукових хвиль підвищеної інтенсивності.

Друга глава присвячена математичному моделюванню даного процесу, були обрані матеріали для подальших досліджень та їх механічні характеристики. Для вирішення поставленої задачі було прийняте рішення щодо методу проведення експерименту, а також обрана типова задача, яка з фізичної точки зору відображала суть процесу ударної взаємодії частинки забрудненої рідини з поверхнею фільтроелементу. Було виявлено, що в даній ситуації має місце контактна взаємодія, і для визначення НДС за основу буде взятий розв'язок контактної задачі Герца методом скінченних елементів, за допомогою програмного комплексу ANSYS Mechanical Workbench. Так як контактна задача Герца відображає процес контактної взаємодії зі статичної точки зору, задача Герца буде розв'язана квазістатичним методом. Була проведена постановка задачі, визначення граничних умов, навантажень та сил.

Рішення такої задачі передбачає введення коефіцієнту динамічності, що і було зроблено у наступній главі. Також визначення коефіцієнту динамічності потребує значення швидкості частинки, тому було прийнято взяти розрахункову швидкість рівною максимальній швидкості звуку у відповідному середовищі.

У третій главі був проведений сам обчислювальний експеримент. Відповідно до складеного плану експерименту, він поділявся на 3 основні етапи. Так як для визначення коефіцієнту динамічності необхідно визначити максимальні переміщення при статичному навантаженні, першим етапом було розраховано НДС фрагменту фільтроелементу під дією на пластину сили тяжіння, що була прикладена до центру мас апроксимованої частинки забруднювача. Після визначення максимальних переміщень для досліджуваних матеріалів при розмірах частинки 10 та 100 мкм, були розраховані коефіцієнти динамічності для кожного випадку. З врахуванням знайдених коефіцієнтів був проведений повторний статичний розрахунок в результаті якого було отримано 18 наборів результатів для трьох матеріалів, трьох середовищ, а також двох різних розмірах частинки забруднювача.

Аналіз результатів показав, що криогенна нержавіюча сталь марки 12X18H10T показала найкращі показники міцності та найменший коефіцієнт проникнення в порівнянні з іншими матеріалами. Приймаючи до уваги, що дана сталь має гарну сумісність з агресивними середовищами, а також велику ударну в'язкість, можна зробити висновок, що вона добре підходить для використання в подібних фільтрувальних системах.

У четвертій главі був проведений аналіз стартап-проекту на основі проведеної роботи. Він показав, що подальша імплементація проекту не є доцільною, адже він не може знайти свою цільову аудиторію серед звичайних споживачів та потребує надзвичайно великих інвестицій вже на початку.

## Список літератури

1. Патент № RU 2037327; 19.06.95. Бюл. №17; Ковалев А.А.  
Ультразвуковой фильтр.
2. Зилинский А.И., асп., Луговской А.Ф., д.т.н., проф., Гришко И.А.,  
к.т.н., доц. НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев  
Украина МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА  
ФИЛЬТРАЦИИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ ПОВЫШЕННОЙ  
ИНТЕНСИВНОСТИ
3. Агранат Б.А. и др. Ультразвуковая техника, №3, 1967, с. 1-5.
4. Розенберг Л.Д. Труды VI всесоюзной акустической конференции,  
серия Д11. Изд-во АН СССР, 1968
5. Кнэпп Р. Дейли Дж., Хеммит Ф. Кавитация. - М.: Мир, 1974.-688  
с. Flynn H.G. Physics of acoustic cavitation in liquids. In “Physical  
Acoustics”, v. IV. W. Mason (Ed.), N.Y., 1964.
6. А.Ф. Луговской, д-р.техн.наук, проф., И.А. Гришко, асп., А.В.  
Мовчанюк, канд.техн.наук, доц. НТУ Украины «Киевский  
политехнический институт», г. Киев ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ  
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТРУБЧАТОГО КАВИТАТОРА В РЕЖИМЕ  
РАДИАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ
7. Шестоперов В.Ю. СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ИХ  
СТОЙКОСТИ // Современные проблемы науки и образования. – 2015.  
– № 1-1.
8. 11 11. Ландау, Л. Д., Лившиц, Е. М. Теория упругости: Москва: Наука,  
1987. – 246 с.
9. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных  
технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. - К.: Видавничо-  
поліграфічний центр «Київський університет», 2007. - 244 с.
10. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. -  
М.: Советская энциклопедия, 1979. -400 с.

11. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. ГИИТЛ, 1949, 236 с.
12. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. Ansys для инженеров — М: Машиностроение-1, 2004. — 512 с.
13. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: / Вітенько Т.М., -Тернопіль, (видавництво тернопільського державного університету імені Івана Пулюя). 2009.- 224с.
14. Александров А.В., Потапов В.Д. , Державин Б.П. Сопротивление материалов: учеб. для вузов / под ред. А.В. Александрова. 3-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2003. 560 с
15. Л.Д. ЛАНДАУ, Е.М. ЛИФШИЦ. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ 4-е изд., испр. -М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. - 248 с. (т. VII)
16. Агранат Б.А., Башкиров В.И., Китайгородский Ю.И., Хавский Н.Н. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. - М.: Металлургия, 1974. - 503 с.
17. Луговський О.Ф., Чорний В.І. Застосування ультразвукових коливань у пристроях фільтрування рідини // Вестник Национального технического университета Украины «КПИ». Машиностроение.- 1999. - Вил. 35.-с. 111-119.
18. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. - К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2007. - 244 с.